SEPTIEMBRE 2009

# INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

**ASTRONOMIA**
Agujeros negros supermasivos

**BIOLOGIA**
Origen de la vida: ¿metabólico o genético?

**GALILEANA**
Historia del telescopio

**NEUROCIENCIA**
Lateralidad cerebral

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

# BIOCARBURANTES

obtenidos a partir de paja, hierba y madera

00396
9 770210 136004

# SUMARIO

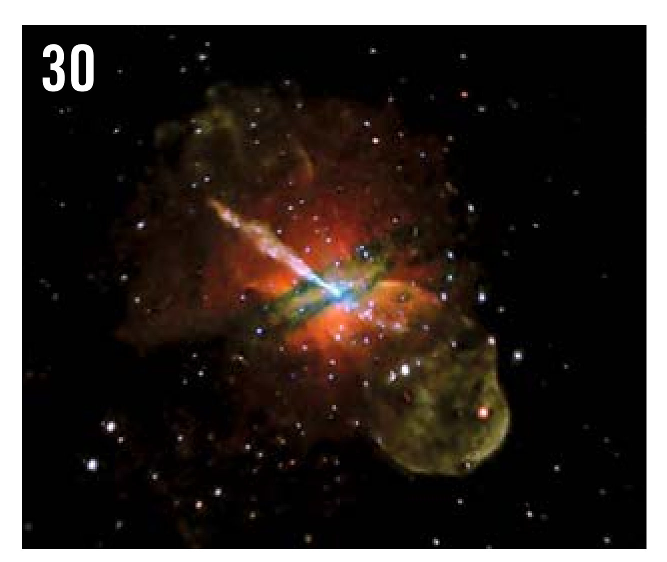
Septiembre de 2009/ Número 396




Lecciones de un astronauta lunar para futuros exploradores de Marte.




Las bacterias panresistentes cuentan con una membrana adicional que impide la entrada de numerosos antibióticos.




No se está tan lejos de observar los horizontes de sucesos en el centro de la galaxia.

## ARTICULOS




Las desventajas de los combustibles de grano no las tendrían los celulósicos.




¿Por qué no se inventó el telescopio antes de 1608?




La división del trabajo entre los dos hemisferios cerebrales no es un rasgo exclusivo de los humanos.



# SECCIONES

INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

**SCIENTIFIC AMERICAN**

ACTING EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

**DISTRIBUCION**
**para España:**
**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

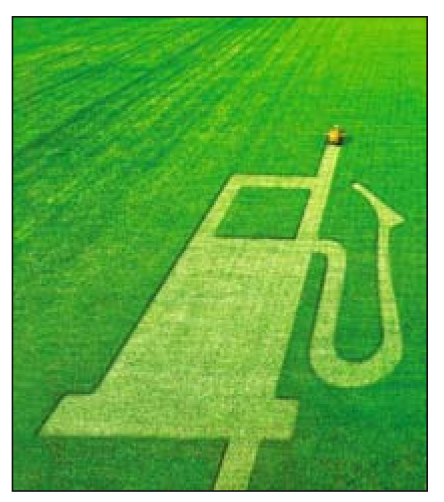
**para los restantes países:**
**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

**PUBLICIDAD**
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

**COLABORADORES DE ESTE NUMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

J. Vilardell: *De la Luna a Marte, Curiosidades de la física y Hace...*; Luis Bou: *Nuevas tácticas contra bacterias resistentes* y *Puesta al día*; Ernesto Lozano Tellechea: *Los orígenes del telescopio*; Anna Ferran: *Lateralización del cerebro*; Rolf Gaser: *La ciencia de las burbujas y los colapsos*; Juan Manuel González Mañas: *El origen de la vida*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



**Portada:** Kenn Brown, Mondolithic Studios

**SUSCRIPCIONES**

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

**Precios de suscripción:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 65,00 euro | 120,00 euro |
| Resto del mundo | 100,00 euro | 190,00 euro |

**Ejemplares sueltos:**

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.






ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

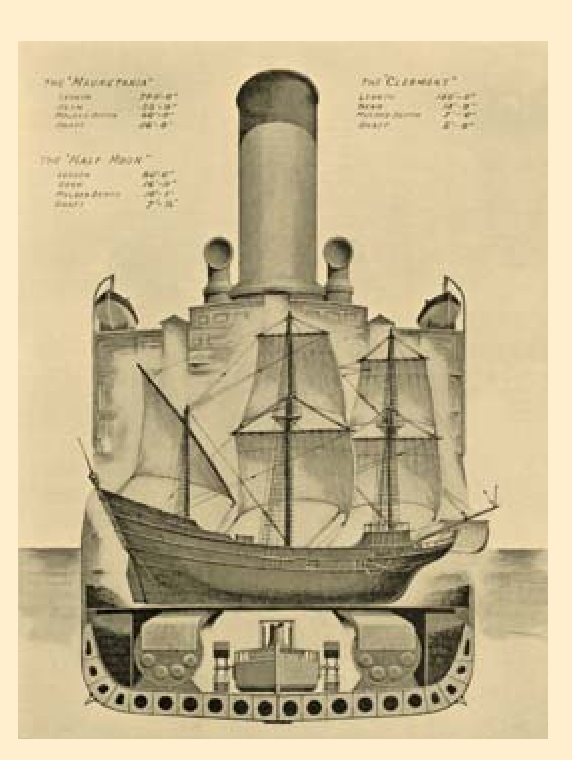
*Recopilación de Daniel C. Schlenoff*

## ...cincuenta años

**Radiación.** «¿Qué idea debemos hacernos acerca de la radiación ionizante? Esta nos ha acompañado siempre y así será por el tiempo previsible. Probablemente, gracias a la selección natural, nuestro sistema genético esté perfectamente ajustado a la radiación de fondo normal. Una radiación adicional aumentaría la frecuencia de las mutaciones, la mayoría de las cuales resultarían nocivas. La exposición a grandes cantidades de radiación aumentaría las enfermedades malignas; puede que ocurra igual con cantidades reducidas. A la vista de efectos tan potencialmente perjudiciales no debe regatearse ningún esfuerzo posible para reducir la radiación ionizante a los niveles más bajos que sea posible conseguir. Sobre la lluvia radiactiva debida a los ensayos de armas nucleares, la ciudadanía tiene la idea de que contribuye modestamente a los niveles de radiación en el planeta. Sólo por esta razón deben interrumpirse los ensayos. —George W. Beadle»

## ...cien años

**El censo.** «El recuento, al final de cada década, de los hombres, mujeres y niños que hay en EE.UU. es una de las grandes tareas encomendadas al gobierno. Para facilitar el recuento, se emplearán, en el decimotercer censo, las máquinas invención del señor James Powers, especialista mecánico de la Oficina del Censo, que se ensayaron con éxito en el reciente censo cubano y actualmente en uso en la División de Estadísticas Vitales. El recuento censal mecánico requiere dos tipos de máquinas. La clave del sistema, empero, corresponde a una tarjeta perforada que contiene los datos recogidos por los encuestadores, quienes se desplazan de casa en casa por todos los rincones del país. Los datos comprenden la naturaleza y extensión de nuestras industrias y el montante de nuestra riqueza.»



**TRES SIGLOS DE DISEÑO NAVAL: Se muestra a escala el *Media Luna* de 1609 de Henry Hudson ante una sección transversal del vapor correo de *Su Majestad Mauritania*, que en 1909 ostentaba la marca de la travesía más rápida del Atlántico.**

**Tricentenario de Henry Hudson.** «El buque *Media Luna* se hizo a la mar en Amsterdam el 4 de abril de 1609, con una tripulación de dieciocho marineros holandeses e ingleses. El 3 de septiembre, el *Media Luna* echó el ancla en Sandy Hook (Nueva Jersey). Pasaron la semana explorando la bahía en una barca; 'encontraron un buen acceso entre dos lenguas de tierra' (El Estrecho) y así, el 12 de septiembre, penetraron en 'un río tan magnífico como encontrarse pueda'. Cuando la grúa flotante del arsenal naval de Brooklyn izó la réplica del *Media Luna* desde la cubierta del *Soestdyk*, a bordo del cual fue transportado desde Holanda, y lo depositó en el agua, la expresión de sorpresa fue general ante su diminuto aspecto, pues no era mayor que un pequeño remolcador de puerto.»

## ...ciento cincuenta años

**Lombrices.** «La lombriz de tierra común, pese a ser despreciada y pisoteada, es una criatura realmente benéfica. Según el señor [Charles] Darwin, proporciona a la tierra una cierta labranza subterránea, ejecutando, bajo tierra, lo que la pala hace en la superficie del jardín o el arado en la tierra cultivable. Los campos sobre los que se esparce cal, marga consumida o ceniza, con el tiempo acaban recubiertos de una capa de mantillo finamente dividido. Ese resultado, que los agricultores suelen atribuir a los 'efectos penetrantes' de aquellas sustancias, se debe en realidad a la acción de las lombrices. 'Un campo abonado con marga ha quedado cubierto, al cabo de 80 años, por un lecho de tierra de 33 centímetros de espesor.'»

**El mercado de algodón.** «Acaba de cerrarse la 'campaña anual' del algodón, que ha resultado algo accidentada. El pánico financiero del año pasado hizo que durante éste se redujera mucho el consumo, con lo que en manos de los comerciantes quedaron muchas existencias y considerables cantidades de materias primas en las fábricas. La vuelta de la calma al mercado monetario ha estado acompañada por unas cosechas abundantes, unos alimentos baratos, unas tarifas de transporte reducidas y un gran consumo de productos, lo que augura que se absorberá la totalidad de la cosecha. Hasta enero, las compras en el país y en el extranjero fueron muy elevadas, a unos precios que mejoraban.»

**Maléfico popelín.** «Dice el profesor Hamilton: 'Los caballeros han adoptado como vestimenta nacional un fino y ajustado traje de popelín negro. Para los extranjeros parecemos estar siempre de luto: viajamos de negro, escribimos de negro, trabajamos de negro. Incluso los jornaleros prefieren siempre el mismo invariable y monótono popelín negro. Es un tejido demasiado fino para resultar cálido en invierno y demasiado negro para que sea fresco en verano.»

*SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. CI, N.º 13; 25 DE SEPTIEMBRE DE 1909

## ¿Qué ha sido de ...?

*Recopilación de Philip Yam*

### Mercurio en el pescado

Era sabido que el mercurio debido a la contaminación industrial afecta a los ecosistemas de agua dulce y entraña riesgos para la salud. Gracias a nuevos datos se ha podido comprender también el ciclo marino del mercurio. Investigadores del Servicio Geológico de los EE.UU. y de otras instituciones, basándose en muestras tomadas en 16 puntos, repartidos entre Alaska y Hawai, y en simulaciones informáticas, han concluido que la descomposición bacteriana de algas, al hundirse desde la superficie hasta profundidades medias, desempeña una función crucial. En presencia de mercurio, que en este estudio llega desde Asia por las corrientes marinas, el proceso de descomposición crea el catión metilmercurio, que asciende por la cadena trófica y acaba en peces depredadores, como el atún. En el estudio, publicado en *Global Biochemical Cycles* del 1 de mayo, se señala también que la contaminación por mercurio del Pacífico Norte se ha incrementado en un 30 por ciento en los últimos 15 años.



**El atún constituye una de las principales fuentes de mercurio en la dieta humana.**

### Más opciones, ¿menor satisfacción?

Cuando disponemos de un exceso de opciones, puede que nos sintamos insatisfechos con la decisión final. Mediante experimentos descritos en *Psychology and Marketing* de marzo pasado, se ha buscado reconciliar estos hallazgos con teorías psicológicas y económicas que equiparan un mayor abanico de posibilidades con una satisfacción mayor. En uno de los ensayos, los participantes tenían que hacer un donativo a una organización, seleccionada de una lista que contenía, ora 5 nombres, ora 40. No se observó el efecto de "elección embarazosa", ni siquiera en el caso de la lista extensa, excepto cuando a los participantes se les pidió que justificasen su elección. En tales casos parecían mostrarse menos satisfechos con sus decisiones, porque se veían obligados a recordar las opciones desestimadas. Los investigadores proponen que el efecto "elección embarazosa", menos robusto de lo que se creía, se presenta sólo bajo ciertas condiciones.

—*Kathryn Wilcox*



**"PITO PITO". La abundancia de opciones resulta embarazosa sólo en ciertas situaciones.**

### El lobo, desenrolado



El lobo gris (*Canis lupus*) ha medrado considerablemente en EE.UU. merced a la repoblación de los últimos años. Desde 2003, la agencia estadounidense de pesca y fauna silvestre trata de excluir a ese gran depredador de la lista de especies en peligro de extinción, plan al que se han opuesto quienes juzgan que los lobos caerían víctimas de la sobrecaza. En abril, el éxito era casi completo: se determinó que en las regiones clave la población de lobos era suficiente y que podía ser controlada por la mayoría de los departamentos estatales de protección de la naturaleza. No obstante, la agencia proyecta seguir supervisando la población lupina durante los próximos cinco años; podría reintegrar al lobo en la lista de especies protegidas en cualquier momento.

—*Kathryn Wilcox*

### Apto para el servicio

El 13 de mayo pasado, la tripulación de la lanzadera espacial *Atlantis* atracó en el Telescopio Espacial Hubble para revisar y poner a punto por quinta y última vez tan venerable instrumento. La NASA había optado por eliminar esa peligrosa misión tras el desastre de la *Columbia* en 2003, pero la insistencia pública y la presión política han acabado por imponerse. Además de las operaciones de mantenimiento, el Hubble ha sido dotado de nueva instrumentación, lo que permitirá ahondar en el vacío existente en longitudes de onda del infrarrojo cercano, con el fin de atisbar el universo de hace 500 millones de años. Si todas las reparaciones y aditamentos funcionan, Hubble podría seguir bruñendo su impresionante panoplia de descubrimientos [*véase* "Los 10 descubrimientos principales del Hubble", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; septiembre, 2006] hasta 2014 cuando menos, fecha en la que el Telescopio James Webb, su sucesor, se hallará también en órbita.



**El Telescopio Espacial Hubble, con la ventana de observación abierta.**

MARK NAVALES *Getty Images* (*atún*); MARK NEWMAN *Photo Researchers, Inc.* (*lobo*); PORNCHAI KITTIWONGSAKUL *Getty Images* (*supermercado*); PHOTO RESEARCHERS, INC. (*Hubble*)

PLASTICIDAD NEURONAL

## Mano a mano

Los trasplantes dobles de manos podrían hacer que los pacientes cambiasen de zurdos a diestros o viceversa. Dos hombres que habían perdido las dos manos en accidentes laborales recibieron trasplantes después de esperar entre tres y cuatro años. A pesar de tan larga espera y de que el cerebro suele reasignar las áreas vinculadas al control del miembro amputado a otros músculos, los investigadores del Centro de Neurología Cognitiva de Lion encontraron que el cerebro de los pacientes pudo conectarse a las nuevas manos, las cuales consiguieron realizar tareas complejas (en una prueba, uno de los pacientes reparó cables eléctricos). Aunque ambos pacientes eran diestros, su mano izquierda consiguió conectarse al cerebro al menos un año antes que la derecha, con lo que se convirtieron en zurdos. La causa de este cambio no está clara. Es posible que la superioridad previa de la mano derecha hubiera reducido la flexibilidad de las regiones correspondientes del cerebro, dificultando las nuevas conexiones, o quizá las operaciones quirúrgicas se realizaron de forma ligeramente diferente.



**MANOS TRASPLANTADAS retuercen cables, pero el diestro quizá se convierta en zurdo.**

*—Charles Q. Choi*

CLIMA

## La selva tropical y la lluvia: ¿causa o efecto?

Durante mucho tiempo se ha pensado que las selvas tropicales eran el resultado de lluvias intensas. Ahora se baraja una nueva hipótesis: las regiones arbóreas con determinadas características podrían facilitar las condiciones que provocan la lluvia. Según esta hipótesis de la "bomba biótica", los bosques que abarcan grandes superficies, la selva del Amazonas por ejemplo, atraen ingentes cantidades de vapor de agua de la siguiente forma: la evaporación y condensación de agua en el bosque provoca la caída de la presión atmosférica local; a su vez, esa caída de la presión atrae aire húmedo, lo que tiene como consecuencia que llueva, con la que aumenta aún más la concentración de vapor de agua en el bosque. Es decir, se trata de un fenómeno de realimentación positiva. El investigador Douglas Sheil, de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre, afirma que "esta teoría podría explicar por qué permanecen tan húmedas las regiones continentales interiores cubiertas de selva tropical". Sheil recupera el modelo de "bomba biótica" propuesto en 2006 por Anastassia Makarieva y Victor Gorshkov, ambos del Instituto de Física Nuclear de San Petersburgo. Los resultados del estudio "podrían ayudarnos a descubrir el verdadero riesgo de la deforestación masiva". Sheil destaca lo prometedor del modelo, si bien se requieren más datos relativos al patrón de las circulaciones de aire y al tipo de vegetación.

*—Steve Mirsky*



**LAS SELVAS HUMEDAS podrían disminuir la presión atmosférica local, lo que generaría vientos que les llevarían más vapor de agua.**

DATOS

## Vuelve la cigüeña

2007 es el año de la historia en que han nacido más estadounidenses. Según los datos provisionales del Centro Nacional de Estadísticas de la Salud, los nacimientos superaron el máximo previo de 1957, la cima del llamado "baby boom". La tasa de nacimientos ha subido paulatinamente durante los últimos años, por razones que no se conocen con exactitud. Las mujeres que vivían en 2007 en los Estados Unidos tendrán una media de 2,1 hijos a lo largo de la vida, justamente la cifra considerada por los demógrafos como el mínimo para mantener la población sin tener que recurrir a la inmigración. Tienen muchos menos hijos que en los años cincuenta (cuando todavía no había píldora anticonceptiva); en esa época las mujeres tenían casi cuatro hijos de media. Sin embargo, ahora la población es casi el doble que entonces; esa es la razón principal del nuevo máximo de nacimientos.




**EE.UU. en 1957**

| | |
|---|---|
| **Población:** | **171 millones** |
| **Nacimientos:** | **4.308.000** |
| **Nacimientos por 1000 mujeres de entre 15 y 44 años:** | **122** |

**EE.UU. en 2007**

| | |
|---|---|
| **Población:** | **301 millones** |
| **Nacimientos:** | **4.317.119** |
| **Nacimientos por 1000 mujeres de entre 15 y 44 años:** | **69** |

*Cifras de población provenientes del censo oficial de los Estados Unidos: www.census.gov/popest/. Los informes del Centro Nacional de Estadísticas de la Salud están disponibles en www.cdc.gov/nchs/about/nchs_en_espanol.htm*

CORTESIA DE ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS/PNAS *(manos)*; D. NORMARK *Getty Images (selva)*; MATT COLLINS

## BIOLOGIA

# Charla electromagnética

Los organismos unicelulares podrían comunicarse por medio de la radiación. Daniel Fels, del Instituto Tropical Suizo de Basilea, mantuvo poblaciones de *Paramecium caudatum* en completa oscuridad dentro de tubos transparentes, que evitaban que las células se enviasen entre sí mensajes químicos. Descubrió que los microorganismos podían influir en el comportamiento alimentario y en las tasas de crecimiento de sus vecinos de otros tubos, lo cual sugiere la existencia de señales electromagnéticas. Los microorganismos parecían usar al menos dos frecuencias para comunicarse, una de las cuales correspondía a la radiación ultravioleta. Por ejemplo, pequeñas poblaciones de paramecios crecían bastante más cuando estaban separadas de otras poblaciones más grandes por cristales que bloqueaban la radiación ultravioleta, en lugar de por cristal de cuarzo, que la deja pasar. Las estructuras celulares relacionadas con estos mensajes aún no han sido identificadas. Fels sugiere que las señales en cuestión podrían llevar al descubrimiento de nuevas técnicas médicas no invasivas.

*—Charles Q. Choi*



**CONVERSACION LUMINOSA. Un paramecio puede utilizar dos frecuencias de luz para comunicarse.**

## FISIOLOGIA

# Mezclas de sabores

Entre los cinco sabores, el salado, el dulce y el umami (carnoso o sabroso) son apetitosos y nos llevan hacia nutrientes esenciales, mientras que los sabores amargo y ácido, repelentes, nos alertan de sustancias que pudieran resultar nocivas. La mezcla de sabores apetitosos y repelentes le envía al cerebro información contradictoria, cosa que los sentidos tratan de evitar cuando nos proporcionan información que podría salvarnos la vida. Esa señal mixta constituye la causa de que nos repelan los alimentos que se han descompuesto. No es conveniente ingerir una mezcla de lo bueno y lo malo.

Las medicinas, en grandes cantidades, son venenosas. Por eso las encontramos amargas. Pero pueden resultar menos desagradables camufladas bajo una capa de azúcar. De igual manera, quienes encuentran desagradable el amargor del café lo enmascaran con azúcar, leche o crema.

Ya de adultos podemos desdeñar tales advertencias gustativas y tomarle gusto al café, las aceitunas o a los quesos fuertes. Pero provocaríamos una confusión en nuestros sentidos si mezcláramos un sabor que en un principio era repelente con otro apetitoso. ¿Le apetecerían unos pepinillos con cacao? La confusión, por otra parte, puede también resultar deliciosa: en la cocina china es corriente la combinación de lo dulce y lo agrio.

*—Tim Jacob,*
profesor de ciencias biológicas,
Universidad de Cardiff

## HIELOS POLARES

# La Antártida y el nivel del mar

La máxima subida del nivel del mar provocada por el rápido calentamiento y el consiguiente colapso de la capa de hielo de la Antártida Occidental podría ser de 3,3 metros y no cinco o más como se creía hasta ahora. Se ha calculado con un nuevo modelo que considera que sólo una parte de la capa de hielo desembocará en el mar, concretamente las zonas asentadas por debajo del nivel del mar o en pendiente bajante hacia el océano. Las partes de la capa situadas por encima del nivel del mar o en pendiente bajante hacia el interior probablemente resistirán. El análisis, sin embargo, no aborda la fusión de la capa de hielo en el resto del mundo. En Groenlandia, por ejemplo, hay suficiente hielo para elevar el nivel del mar siete metros.

*—David Biello*

## BIOLOGIA

# Señales de vida

Las hormigas tienen eficientes prácticas funerarias: sacan fuera del hormiguero a sus compañeras muertas antes de que los elementos patógenos de los cadáveres puedan contagiar al resto de la colonia. Algunos expertos pensaban que las hormigas detectaban los productos generados por la descomposición de los cuerpos, pero un nuevo estudio resta verosimilitud a dicha hipótesis. Un grupo de entomólogos de la Universidad de California en Riverside ha descubierto que las hormigas argentinas pueden detectar los cadáveres antes de que comience la descomposición. Es más, el equipo descubrió que las hormigas vivas producen dos sustancias químicas, llamadas dolicodial e iridomirmecina, que parecen decir "todavía no estoy muerta". Estos productos controlan la necroforesis, eliminación de las hormigas muertas por parte de sus compañeras. Ambas sustancias desaparecen rápidamente tras la muerte: transcurridos diez minutos los niveles son inferiores a la mitad.

*—John Matson*

M. I. WALKER *Photo Researchers, Inc. (paramecio)*

# Nanohilos semiconductores

*Los nanohilos semiconductores se han convertido, gracias a sus novedosas propiedades físicas, en piezas básicas de la electrónica*

La nanotecnología está dando ya soluciones a las necesidades actuales, pero a la vez marca las líneas a seguir en el futuro. El reto ahora consiste en la síntesis de estructuras de sólo unos centenares de átomos, donde las nuevas propiedades que aparecen al llegar a dimensiones tan pequeñas se rigen por la mecánica cuántica.

Los nanohilos sintetizados a partir de materiales semiconductores han demostrado ser las piezas ideales para diversas líneas de investigación sobre las futuras generaciones de dispositivos electrónicos nanométricos.

Los nanohilos son estructuras unidimensionales de sólo unos cuantos nanómetros de diámetro, o de unas pocas decenas como mucho, y cuya longitud, en comparación, es casi infinita: hasta de varias micras. Con esta morfología filiforme, si el material que los conforma es semiconductor, conseguiremos un confinamiento de carga (se trate de electrones o de "agujeros", la ausencia de electrones allá donde deberían estar en la estructura ordenada del material) que circulará sobre todo en la dirección longitudinal: actuará como un "hilo eléctrico". Introduciendo en los nanohilos zonas de dopaje selectivo con átomos donadores o aceptadores de carga, podemos conseguir la creación de uniones PN —de semiconductores dopados para que circulen por ellos cargas negativas y semiconductores dopados para que sean cargas positivas las que transmitan la corriente—: o lo que es lo mismo, creamos en los hilos diodos en la nanoescala.

La creación de un diodo es el paso previo a la creación de un transistor: se alternan en un mismo hilo capas con distinto dopaje o de diferentes materiales semiconductores, aislantes y metales. Los nanohilos presentan, además, unas propiedades optoelectrónicas envidiables; pueden funcionar como diodos emisores de luz (LED), siempre que las propiedades del semiconductor de base o la cuantización en esas escalas tan bajas lo permitan. De este modo, y gracias a que la técnica actual permite seleccionar la localización en la que se quiere ir generando los nanohilos y tener un control casi absoluto del depósito de capas atómicas de diferentes materiales sobre ellos, podemos crear dispositivos electrónicos u optoelectrónicos con una alta densidad de transistores, diodos o LED y, por lo tanto, circuitos complejos o paneles lumínicos que ocupen muy poco espacio.

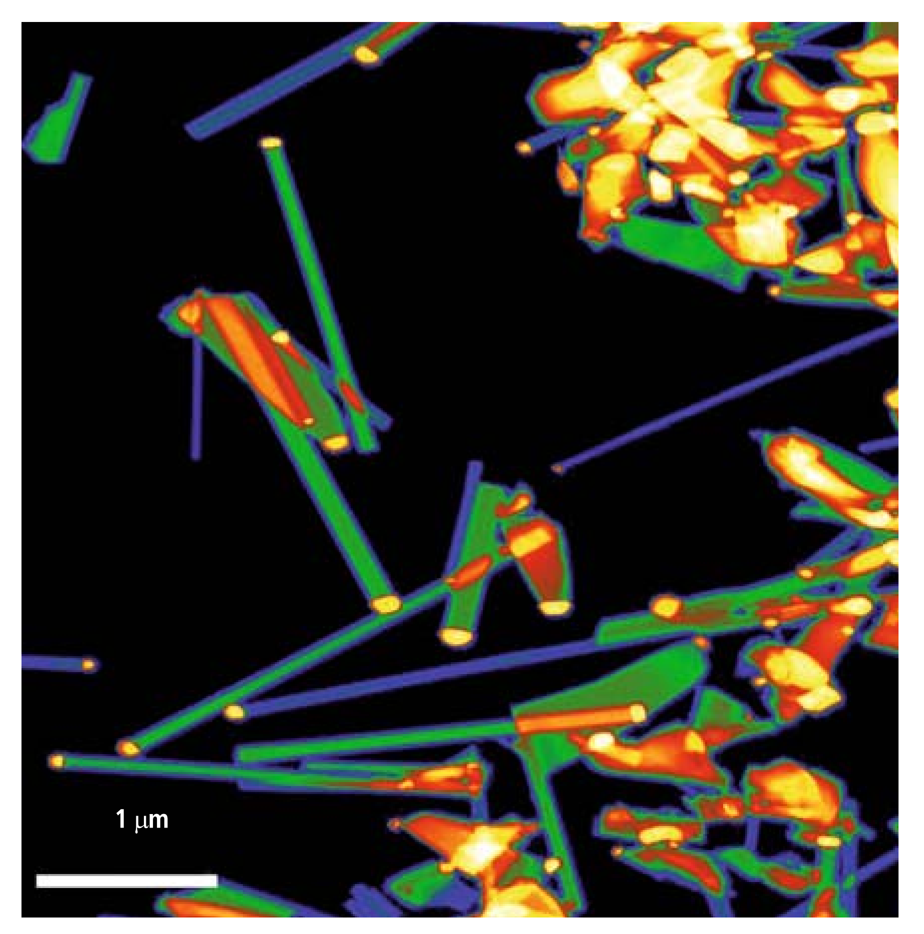
El menor espacio implica también un menor consumo energético y un aumento de las prestaciones, de suerte que un solo dispositivo desempeña diversas funciones. En este sentido, los nanohilos semiconductores se han venido utilizando tanto para la creación de microdispositivos o nanodispositivos electrónicos y optoelectrónicos, como para sensores de diversa índole o para la creación de generadores de energía y de células solares de alto rendimiento.

**1. Imagen coloreada obtenida en un microscopio electrónico de transmisión de la sección transversal de cuatro nanohilos semiconductores de arseniuro de galio (GaAs) con multipozos cuánticos coaxiales hexagonales de AlAs/GaAs para aplicaciones en optoelectrónica. Sintetizó estos nanohilos el grupo de Anna Fontcuberta Morral en el Instituto Walter Schottky de Múnich.**

IMAGEN Y ANALISIS DE LA MUESTRA POR JORDI ARBIOL, DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA DE LA UNIVERSIDAD DE BARCELONA

### Aplicaciones de los nanohilos semiconductores en optoelectrónica

Se han obtenido estructuras de gran complejidad combinando materiales a lo largo de la dirección de crecimiento de los nanohilos, tanto de forma coaxial, alrededor de su eje, como axial, a lo largo del mismo. Hasta el momento, las heteroestructuras coaxiales han mejorado el rendimiento de los dispositivos basados




**2. Imagen coloreada obtenida en un microscopio electrónico de transmisión de diversos nanohilos semiconductores de ZnO. Sintetizó los nanohilos Joan D. Prades y los analizó Jordi Arbiol, ambos del Departamento de Electrónica de la Universidad de Barcelona.**

en nanohilos, gracias al confinamiento de carga en el núcleo de éstos, con la consiguiente reducción de la dispersión superficial.

La alternancia de capas de materiales semiconductores con distintas energías en la banda prohibida da lugar a la formación de pozos cuánticos con propiedades de emisión de fotones distintas de las del material en el núcleo. Por esta razón, las estructuras coaxiales o núcleo-capa en nanohilos se están utilizando para modular y controlar las propiedades optoelectrónicas de emisión; por ejemplo, para la fabricación de diodos emisores de luz o láseres multicolor.

### Nanohilos semiconductores para la generación de energía

Los nanohilos semiconductores no sólo se pueden utilizar para generar luz; también se están diseñando dispositivos para captarla valiéndose de las propiedades semiconductoras. En este sentido, las uniones PN y PIN en nanohilos hacen que éstos puedan usarse en células solares de alto rendimiento; se abren así nuevas perspectivas en el campo de las energías renovables.

Por otro lado, algunos nanohilos semiconductores pueden generar cierto potencial eléctrico cuando se someten a una tensión mecánica (es decir, tienen un comportamiento piezoeléctrico). Esta característica ha permitido fabricar nanogeneradores de energía a partir del biomovimiento muscular: pequeños dispositivos basados en técnica de nanohilos podrían acumular energía a partir del simple movimiento de los dedos al teclear estas líneas.

**Jordi Arbiol**
*Profesor de investigación ICREA*
*Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, CSIC*

# Los tejados verdes

*Cubiertas vegetales de plantas autóctonas para los edificios*

A lo largo del tiempo, las ciudades han ido ganando terreno a la naturaleza, destruyéndola y sustituyendo la superficie vegetal por superficies inertes. Aunque se incorpore arbolado en calles y parques, la mayor superficie visible de las ciudades, la de las cubiertas, queda sin vegetar. Se producen así alteraciones microclimáticas que convierten las ciudades en islas de calor.

Sin embargo, la arquitectura y la vegetación han estado hermanadas a lo largo de la historia. La referencia más antigua al uso de la vegetación en las cubiertas la tenemos en los patios y huertos construidos en Egipto y Persia hacia 2600 a.C., o en los Jardines Colgantes de Babilonia de 600 a.C., que eran auténticas cubiertas vegetales. También, en edificios singulares construidos en los siglos XIX y XX; por citar un ejemplo, los del conjunto del Rockfeller Center, de Ralph Hancok, en Nueva York.

¿Qué ha hecho que esas cubiertas mantengan todavía su viabilidad e interés? ¿Cuáles son, además de su indudable atractivo, sus ventajas ambientales y energéticas?

Los organismos regulan su temperatura de un modo u otro. La vegetación controla su temperatura foliar adaptándola a la del ambiente en que se encuentra, sin que difiriera de ella en más de 2 ºC. En esos mismos momentos, una superficie inorgánica, de igual color, puede tener en verano una temperatura entre 30 y 40 ºC superior a la del aire, y en invierno hasta 10 ºC menos.

La vegetación controla su temperatura combinando varios procedimientos. Dependiendo del color, un porcentaje se refleja y otra fracción se transmite hacia





**Imagen de las nuevas cubiertas ecológicas de tercera generación, las cubiertas ecológicas jardín.**

el suelo a través de la hoja aislada, aunque este factor globalmente desaparece cuando se forman varias capas superpuestas de vegetación. Por otro lado, parte de la energía que absorbe la planta se invierte en producir biomasa. Por último, el resto se disipa, en gran medida por evapotranspiración, a través de los estomas celulares.

Por tanto, la ventaja de los tejados verdes es la de no calentarse cuando reciben la radiación solar en verano, sin menospreciar la absorción de contaminantes atmosféricos, la producción de oxígeno y el incremento del aislamiento térmico.

No podemos obviar los aspectos negativos, como el consumo de agua, el sobrepeso y la necesidad de mantenimiento. Los aspectos negativos se manifiestan con mayor claridad en las cubiertas ajardinadas tradicionales, voluminosas, muy pesadas y con la servidumbre de un mantenimiento constante. Frente a ellas, otro tipo de cubiertas, las denominadas cubiertas ecológicas, de poco porte, ligeras y sin mantenimiento (exentas de riego, abono, poda o resiembra) resuelven en gran medida los inconvenientes mencionados, conservando las ventajas.

La imagen más evidente de una *cubierta ecológica* es la de la vegetación espontánea que surge en los canalones en algunas fachadas, entre las tejas y las piedras de un camino. Son plantas autóctonas y espontáneas que no necesitan que nadie las cuide para prosperar.

El origen de las cubiertas ecológicas actuales se remonta a la posguerra, cuando en Alemania fue necesario reconstruir rápidamente las viviendas destruidas por los bombardeos. Las cubiertas de estas viviendas se protegían con grava, o con lo que era más fácil de encontrar, cascotes y restos de demoliciones. Con esos cascotes posiblemente iba algo de tierra, y a ella llevaron de forma espontánea semillas los pájaros o el viento. Esas semillas prosperaron; de ellas nacieron jardines espontáneos en las cubiertas. Las viviendas en las que habían surgido estos jardines estaban mejor aisladas, gastaban menos energía y proporcionaban ambientes más confortables. Esto se convirtió en un sistema constructivo que permite que hoy en día haya en Alemania cientos de miles de metros cuadrados de cubiertas ecológicas.

Una cubierta ecológica básicamente consta de las siguientes capas: vegetación autóctona sin mantenimiento; un sustrato ligero (que la convierte en aislante), que drena muy bien, para que no se encharque y provoque la pudrición de las raíces, y capaz de retener nutrientes y humedad; un separador que evite la pérdida de finos del sustrato; un sistema de drenaje para evitar el encharcamiento y



**Vegetación espontánea sobre una cubierta.**

la pudrición de las raíces; y un retenedor de agua para aportar líquido en los períodos de sequía.

En ciertas ocasiones, el sistema de drenaje y el de retención de agua puede sustituirse por un pequeño depósito o aljibe situado bajo la vegetación, que cumpla la misma función y aporte ventajas adicionales en climas con baja pluviometría.

En 1994 se construyó la primera cubierta ecológica de España, con el asesoramiento y la tutela de la Universidad Humboldt de Berlín sobre la cubierta de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. La especie vegetal que se plantó fue el *Sedum album*, una planta muy resistente a las sequías y a las heladas, si bien de un aspecto pobre y escaso atractivo.

Desde aquel primer intento, encontramos hoy en España sistemas constructivos con cubiertas ecológicas perfectamente adaptados a nuestras variedades climáticas, con un catálogo de especies vegetales que superan el centenar. Entre ellas se pueden ver plantas de porte alto y plantas rastreras, plantas que florecen en primavera y otras que lo hacen en otoño, y plantas con hojas de colorido, forma y tamaño muy diferentes. En suma, pequeños jardines que se desarrollan sobre una capa de sustrato de 8 o 10 cm, que no necesitan prácticamente mantenimiento y aportan ventajas energéticas para el edificio, un beneficio ambiental para la ciudad y un notable atractivo.

**F. Javier Neila González**
*Catedrático de Acondicionamiento Ambiental y Arquitectura Bioclimática de la Universidad Politécnica de Madrid*

# Ornamentación arquitectónica toraja

*Las matemáticas como pilar de una manifestación cultural*

Los toraja viven en el valle del río Sa'dan, una región montañosa de la isla de Sulawesi, en Indonesia. Entre sus características culturales destaca la arquitectura tradicional. Tanto el *tongkonan* (la casa familiar) como el *alang-alang* (granero para el arroz) son construcciones robustas, hechas de madera, y de planta rectangular, en las que no se utiliza ningún clavo. El espacio encerrado entre los pilares suele destinarse a los animales. Encima se yergue la vivienda, un espacio rectangular cuyas paredes se levantan mediante el ensamblaje de multitud de piezas de madera. Un tejado en forma de silla de montar cubre la edificación y otorga a la casa toraja su forma peculiar. El granero es una copia reducida de la casa. Si ésta se orienta siempre hacia el norte, aquél lo hace hacia el sur, cara a cara con la casa.

Tanto en las fachadas de la casa como del granero se tallan multitud de diseños simbólicos, los *Passura'*, término derivado de *sura'* (escribir). En su ejecución se sigue una distribución bien determinada. Las fachadas se dividen horizontalmente en tres franjas y verticalmente en dos. Cada franja horizontal se corresponde con una división tripartita del cosmos: inframundo, mundo terrenal (habitado por los humanos) y mundo superior (donde moran los dioses). Cada una de las dos mitades verticales determinadas por el eje de simetría central de las fachadas norte y sur se relaciona con la dualidad fundamental: vida y muerte. Los grabados se tallan de acuerdo con una simetría especular vertical en todas las fachadas.

Todos los diseños reciben un nombre específico y poseen un significado relacionado con la sociedad y cultura torajas. Consisten en la repetición sistemática y rigurosa de un motivo inspirado en elementos naturales del entorno. La precisión y simetría de ese desarrollo sistemático se hacen difícil-



**1. Detalle de la fachada este de un *tongkonan* (casa familiar toraja) en construcción.**



**2. Pa' Bulingtong (diseño toraja).**

mente explicables sin la intervención de las matemáticas.

## La obra terminada

Una primera aproximación visual a la ornamentación arquitectónica toraja permite analizar los grabados con relación a los grupos de isometría en friso (unidimensionales) y en mosaico (bidimensionales). Hallamos diseños correspondientes a los siete grupos posibles de simetría en friso. Existen fachadas en las que encontramos los siete. De los 17 grupos de isometría plana, se distinguen 12. La ausencia de grabados con los cinco grupos de simetría restantes obedece a causas culturales, pues los toraja tienen predilección por el ángulo recto y no realizan diseños o figuras con simetría de giro de 60 o 120 grados.

Contemplando las figuras talladas (rectas, segmentos, circunferencias, círculos, sectores circulares, rectángulos, cuadrados y espirales), se advierte que están guiados por leyes y procedimientos que garanticen su paralelismo, perpendicularidad y equidistancia. ¿Qué piensa el artesano toraja cuando trabaja? ¿Qué quiere hacer? ¿Cuál es su método para garantizar el resultado deseado?

## La obra en curso

La observación del proceso muestra que los grabados se tallan directamente sobre las fachadas de la casa y el granero ya montados, por lo que el plano de trabajo es vertical. Todos los diseños se realizan, o bien sobre una retícula —en la mayoría de los casos—, o bien sobre un esquema geométrico. Las líneas e intersecciones de uno y la otra sirven de referente para las figuras labradas. En la construcción de esas retículas y esquemas el artesano debe resolver una serie de problemas geométricos: trazar un segmento por un punto dado; prolongar un segmento en una recta; trazar una circunferencia; determinar el centro de un rectángulo; trazar las mediatrices a los lados de un rectángulo; inscribir un círculo en un cuadrado; trazar una paralela; trazar la tangente común a dos circunferencias; trazar una voluta autoparalela; construir una retícula ortogonal sesgada, y determinar el simétrico de un punto con respecto a un segmento.

A ésos hay que añadir el que es sin duda el problema principal: dividir un segmento en partes iguales.

Los medios empleados para resolver los problemas indicados se reducen a lápiz, listones de bambú, compases (metálico estándar, compás de bambú, tijeras), mazo, gubia y navaja. No se emplean reglas; las distancias no se miden, pero sí se toman y trasladan. Tampoco se utilizan calculadoras, pese a que podría disponerse de ellas. El compás de bambú consiste en un lápiz y un listón de bambú perforado por sus dos extremos. Se clava en la tabla por uno de ellos y por el otro se introduce la punta del lápiz. El radio del arco circular trazado con él es visible en todo momento.

## La obra explicada

Interpelando a los artesanos podemos averiguar qué piensan, qué quieren hacer y cómo lo explican. Sólo así pueden confirmarse los procedimientos observados durante el proceso de talla. Entonces sabemos que algunas resoluciones tienen un marcado carácter visual, como la seguida para determinar las mediatrices de los lados de un rectángulo (el quinto problema de la lista). Primero se determina su centro (cuarto problema) en el punto de intersección de las diagonales. Luego, se trazan por éste, y a ojo, una vertical y una horizontal.

Otras soluciones son más rigurosas. Para trazar un segmento paralelo a otro (séptimo problema) se aplica el procedimiento siguiente: elíjanse dos puntos distintos del segmento dado; con el mismo radio, trácese un pequeño arco circular centrado en cada punto y hacia el mismo lado del segmento; trácese la tangente común a ambos arcos.

La ortogonalidad sesgada de algunos diseños (décimo problema) proviene de la que poseen las diagonales de un rombo o un cuadrado inscrito en el recinto del grabado.

A la hora de trazar la retícula de un grabado, el artesano ha de dividir los lados del recinto en partes iguales (duodécimo problema). Las divisiones suelen hacerse en 2, 3, 4, 6 y 8 partes. La división de un segmento $S$ en tres partes iguales se hace del modo siguiente: tómese un listón de bambú y márquese sobre él una estimación visual del tercio del segmento $S$ a dividir; desde un extremo del segmento $S$, háganse sobre él tres marcas consecutivas del tercio estimado si la última marca coincide con el otro extremo de $S$, la estimación es correcta y el problema está resuelto; de lo contrario, hágase una estimación visual del tercio del error cometido, que se marcará sobre el listón de bambú a la derecha o izquierda de la marca anterior según el error cometido haya sido por defecto o por exceso; aplíquese de nuevo el paso 2 con la última marca e itérese el proceso hasta que el resultado sea exacto (error visualmente imperceptible).

Esta división de un segmento en partes iguales es recurrente y no euclidiana. No es así como Euclides resuelve el problema en *Los Elementos*. Ni la proposición 10 del Libro I, ni las proposiciones 9 y 10 del libro VI siguen tal procedimiento. El método toraja es un algoritmo de la división que garantiza la disminución progresiva del error cometido, el resto de la división. El resultado es "exacto" cuando el resto se

hace nulo, es decir, visualmente imperceptible.

El caso n = 4 se resuelve dividiendo primero en dos y luego cada mitad en otras dos. Este es el llamado *Método Kira-kira* por los artesanos toraja. *Kira-kira* significa "aproximadamente". Y, en efecto, se trata de una división aproximativa, pero cuyo error no sólo se controla, sino que se reduce muy rápidamente. Un análisis matemático detallado demuestra que la convergencia es exponencial y que su rapidez depende de la finura con que se realiza la primera estimación. El hombre posee una gran capacidad visual para estimar mitades y tercios de segmentos como los que deben dividir los artesanos toraja (en torno a los 30 cm o 40 cm). Si añadimos la experiencia que da la práctica, comprenderemos que no necesiten más de dos iteraciones para lograr una división "exacta".

Sin embargo, la interpelación no fue suficiente para saber si el artesano pensaba lo que el investigador había interpretado. Fue necesario que el investigador tomase las herramientas del artesano y se pusiera en su lugar para que aquél le guiase. Unicamente así, inmerso en la situación, pudo confirmarse la conjetura.

## Cultura matemática extraacadémica

Los artesanos toraja no aprenden lo que hacen en la escuela, sino de otros más expertos y de la práctica. Su educación académica no pasa, en los casos más notables, de la escuela elemental. Incluso se dan casos de algunos que, pese a conocer el modo euclidiano de trazar una perpendicular, no lo aplican en la práctica.

En Indonesia y en España, el método académico y educativo para dividir un segmento en partes iguales es el euclidiano. Pero su aplicación en un contexto como el toraja, en el que se trabaja en planos verticales, resulta impracticable. Los grabados toraja no serían como son sin las matemáticas. Difícilmente lo serían con las matemáticas académicas.

**Miquel Albertí Palmer**
*IES Vallés (Sabadell)*
*Grupo de investigación EMiCS*
*Universidad Autónoma de Barcelona*

# De la Luna a



**El único científico y geólogo de campo que ha estado en la Luna ofrece algunas sugerencias a quienes algún día visiten Marte**

**CONCEPTOS BASICOS**

- Los motivos por los que, hace más de 40 años, se emprendió el programa Apolo de exploración lunar no eran en primera instancia científicos. Sin embargo, la ciencia se benefició enormemente. Los astronautas acometieron mediciones y recogieron muestras de roca que acotaron las hipótesis verosímiles acerca de los orígenes de la Luna y proporcionaron un punto de comparación para las observaciones sobre otros planetas.
- Con la última misión, la *Apolo 17*, de diciembre de 1972, el autor se convirtió en el único científico que ha visitado la Luna. Tal y como aquí expone, la exploración de la Luna se mostró similar al trabajo geológico de campo en la Tierra. A fin de averiguar los tipos de roca subyacente, tuvo que aprender a poner mentalmente en claro los efectos de los impactos meteóricos. Resultaba difícil estimar las distancias en aquel paisaje extraño, y la rigidez de los guantes del traje espacial limitaba la presteza en el trabajo.
- Problemas similares surgirán en las misiones a Marte.

**1. CON UNA PALA METALICA especialmente diseñada, el autor toma muestras del suelo del cráter Camelot el 12 de diciembre de 1972. Puede que algún día haya geólogos que hagan el mismo trabajo en Marte; mientras tanto, deben confiar en sustitutos robóticos como el *Mars Pathfinder*, que exploró Ares Vallis en 1997 (*derecha*).**

# Marte

**Harrison H. Schmitt**



En julio hizo cuarenta años de que en la Luna hubiese vida por primera vez. ¿Qué se podrá decir de Marte dentro de cuarenta años? Obama ha confirmado los grandes objetivos para los vuelos espaciales humanos que su predecesor propuso en 2004: retirada de las lanzaderas en 2010, desarrollo de una línea de cohetes (de nombre Ares) que sustituyan a las anteriores, regreso a la Luna en 2020 y seguir a Marte, quizás a mediados de la década de 2030 [*véase* "A la Luna y más allá", por Charles Dingell, William A. Johns y Julie Kramer White; Investigación y Ciencia, diciembre 2007]. *Constelación* se llama a este programa.

Por ahora, a los responsables políticos les preocupa menos Marte que el tiempo que transcurra entre el último vuelo de una lanzadera y el primer vuelo de un cohete Ares, tiempo durante el cual EE.UU. dependerá de Rusia o de empresas privadas para poner en órbita a sus astronautas. Se creía que el lapso sería de dos años; ahora se piensa que será de seis. En mayo, la administración Obama anunciaba que Norman Augustine, antiguo ejecutivo aerospacial, dirigirá una revisión del programa para ver el modo de encarrilarlo.

Aunque Marte aún queda muy lejos, la NASA está diseñando ya astronaves con vistas a un eventual vuelo interplanetario. Las experiencias que Harrison H. Schmitt relata en este artículo sirven de guías para los planificadores.



**2. ESTE PANORAMA DEL LUGAR DE ALUNIZAJE de la misión *Apolo 17* muestra algunos de los efectos visuales que complicaron la exploración lunar. La retrodifusión creaba un halo alrededor de la sombra del astronauta Eugene Cernan —el que toma la fotografía—, y la falta de aire o de referencias familiares determinaban que los objetos pareciesen más cercanos de lo que en realidad estaban. El módulo lunar se hallaba a una distancia de unos 150 metros, y el cerro que se ve más allá, el llamado Macizo Sur, se encontraba a unos ocho kilómetros. El astronauta que se ve es el autor. Estaba instalando el instrumento para medir las propiedades eléctricas de la superficie; tenía que vencerse hacia la derecha porque la rigidez del traje le impedía doblarse.**

Sobre el largo y estrecho valle de Taurus-Littrow descollaban unas montañas más altas que las paredes del Gran Cañón del Colorado. Un sol brillante, más intenso que cualquiera que pueda bañar la Tierra, iluminaba el suelo del valle, salpicado de cráteres, y unas escarpadas laderas montañosas contrastaban marcadamente con un firmamento negro, de boca de lobo. Durante tres días de 1972 —al final del programa Apolo—, mi compañero de tripulación Gene Cernan y yo exploramos aquel valle de casi cuatro mil millones de años de edad, así como las algo más recientes rocas de lava volcánica y las cenizas que en parte lo cubrían.

Fue aquella la primera, y por ahora la única, ocasión en que un geólogo ha efectuado estudios sobre el terreno en otro mundo. Actualmente, EE.UU., la Unión Europea y Rusia, con otros socios internacionales, están considerando la posibilidad de enviar astronautas a Marte para realizar allí trabajos de campo, que se iniciarían dentro del primer tercio de este siglo. ¿Qué le resultará nuevo y qué familiar al primer geólogo que ponga un pie allí?

La mayoría de los relatos de las misiones Apolo se centran en sus logros históricos y en sus éxitos de técnicas avanzadas, pero quienes participamos en ellas recordamos también los aspectos más humanos y menos fronterizos: las caminatas por aquel terreno, las tomas de muestras con un martillo de geólogo, el acarreo de las rocas y la orientación en condiciones extrañas. Cualquier geólogo reconocería los principios y técnicas de exploración de campo que entonces aplicamos. Los fundamentos eran los mismos.

El propósito seguía siendo documentar y representar gráficamente la estructura, la edad relativa y las alteraciones de los rasgos naturales, al objeto de deducir sus orígenes y los recursos que algún día podrían brindar a la civilización. Tampoco salir de la Tierra supuso ningún cambio en los principios de la planificación y ejecución de la expedición, tales como recoger y documentar muestras; más bien, esos principios ganan en importancia cuanto más improbable sea que se vuelva a ese mismo lugar. Particularmente inalterada quedaba la necesidad del toque, la experiencia, la imaginación humanas a la hora de comprender el valor científico y humano de la exploración.

En cada cuerpo nuevo que se explora hay que recurrir a la experiencia adquirida en el último lugar que se haya estudiado, tal y como los geólogos llevan haciendo en la Tierra durante más de doscientos años. Continuamente debemos preguntar qué puede haber de nuevo y qué de diferente. ¿En qué se parecen la geología de Marte, su accesibilidad, la estrategia de exploración y la composición óptima de la tripulación a las correspondientes de las misiones Apolo?

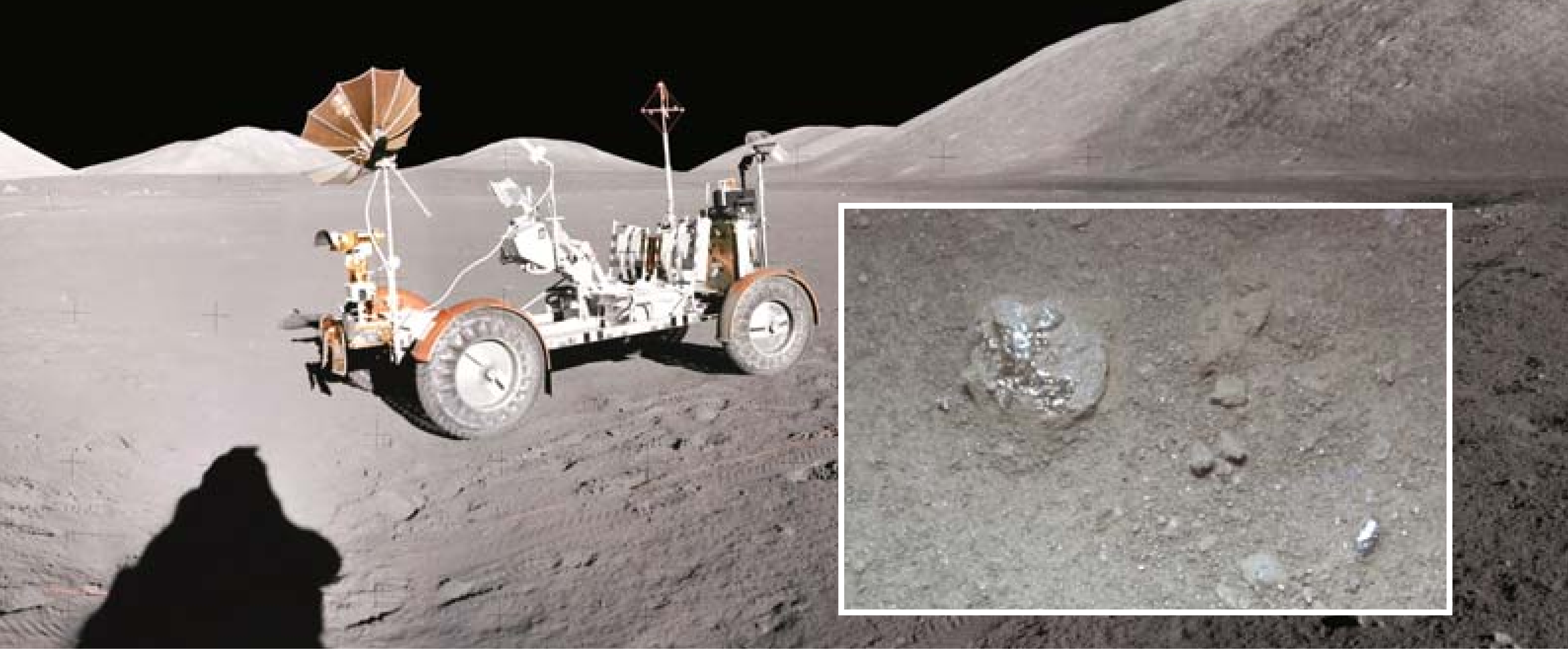
## Campos lunares

Ciertas influencias complicadísimas afectan a las características geológicas de la Tierra. La corteza, el magma, el agua y la atmósfera interactúan entre sí; las placas oceánicas y los continentes se fracturan y colisionan; sobre la superficie impactan objetos celestes; y la biosfera, seres humanos incluidos, altera el paisaje. En la Luna, las influencias durante los últimos cuatro mil millones de años han sido externas, reducidas a los efectos de los impactos y de las partículas energéticas que constituyen el viento solar [*véase* “La nueva Luna”, por Paul D. Spudis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2004].

La ausencia de atmósfera expone los materiales de la superficie al vacío extremo del espacio. Meteoros y cometas, algunos de la insignificancia de las motas de polvo, inciden en la superficie a velocidades de decenas de miles de kilómetros por segundo y modi-

## El autor

**Harrison H. “Jack” Schmitt** fue el piloto del módulo lunar en la misión *Apolo 17*, la última y la más larga de aquellas misiones a la Luna. Desde 1977 a 1982 fue senador por Nuevo México en el Congreso de EE.UU. Antes de ser seleccionado para el programa de astronautas, estudió en el Instituto de Tecnología de California, se doctoró en geología por la Universidad de Harvard y trabajó con Eugene Shoemaker en la Agencia de Estudios Geológicos de EE.UU. Desde 1994 ha enseñado en la Universidad de Wisconsin en Madison y prestó servicio en el Consejo Asesor de la NASA de 2005 a 2008.



fican las rocas, los fragmentos de roca, el vidrio y el polvo. Ese proceso ha producido el "suelo" de la Luna: el regolito lunar, una capa de residuos fragmentados, parcialmente vítreos, que cubre la mayoría de los flujos volcánicos y otras formaciones más antiguas generadas por impactos bajo un espesor de varios metros.

Por tanto, en la Luna la exploración de campo requiere unos geólogos dotados de una especie de visión de rayos X. Para identificar las zonas de contacto entre las masas pétreas mayores, tuve que imaginar de qué modo la formación y expansión graduales del regolito merced a los impactos habían difuminado y atenuado los contactos originales entre minerales distintos, los colores y la textura de las rocas.

Por ejemplo, en el valle de Taurus-Littrow examiné los contactos entre unos flujos de basalto, oscuros y de grano fino, y unas rocas grises fragmentadas, de más edad, denominadas brechas de impacto. Cuando se formó ese contacto debía de ser nítido, una juntura abrupta entre los tipos de roca. Pero al cabo de 3800 millones de años de exposición al espacio se había extendido y ocupaba ahora algunos centenares de metros. En el resto del entorno, un contacto entre el depósito de un alud de polvo y el negro regolito se había expandido escasas decenas de metros desde que sobrevino el alud hace 100 millones de años. Conocer los procesos que modificaron activamente aquellos contactos hizo que me fuese posible determinar sus posiciones originales. Análogamente, un geólogo en la superficie de nuestro planeta debe descubrir de qué modo la erosión terrestre enmascara u oculta las estructuras y los contactos rocosos subyacentes.

En la superficie lunar, la identificación sobre el terreno de los distintos tipos de roca en la piedra expuesta requería desentrañar los efectos del bombardeo micrometeorítico continuo. Cuando las partículas chocan a una velocidad enorme con la superficie, crean un plasma local a muy alta temperatura y funden la roca en el punto de impacto. El plasma eyectado y la piedra fundida vuelven a depositarse en las superficies cercanas; se crea así una fina pátina parduzca y vítrea —contiene partículas de hierro pequeñísimas— que cubre toda la roca.

Igual que, en la Tierra, los geólogos deben ver qué hay bajo el barniz del desierto —una capa de óxidos metálicos que se forma en las superficies pétreas expuestas a la intemperie de las zonas áridas—, yo tenía que escrutar e interpretar rápidamente lo que había bajo la pátina hasta poder desportillar o romper la roca con un martillo.

La pátina lunar está marcada por pequeños hoyos de impacto que contienen vidrio de colores distintos, en consonancia con las variaciones en la composición química de los minerales impactados. Donde el hoyo se formó en un mineral blanco (como el feldespato de plagioclasa, un importante componente de las rocas volcánicas), los resultados son un vidrio gris claro y una mancha blanca característica, producida por fisuras en forma de tela de araña muy finas en el grano del mineral. En el caso de un impacto en un mineral rico en hierro o en magnesio, se origina un vidrio verde. Conocer esos procesos me permitía determinar la composición de una roca por simple inspección.

## ¿Qué hallarán en Marte los exploradores?

En Marte, se esperan unas influencias en las que se combinan las que afectan a la Tierra y a la Luna, ya que es de tamaño intermedio. Ciertamente, nuestros conocimientos cada vez mayores sobre Marte ya confirman esa combinación de procesos. Desde las primeras fotografías proporcionadas por cámaras orbitales y

**3. EN ESTA VISTA DE CERCA de polvo lunar recogido por la *Apolo 11* aparece material vítreo. Probablemente sea suelo que se fundió durante el impacto de un meteoro, salió proyectado y volvió a solidificarse. Muchas rocas lunares están revestidas de una pátina vítrea que les confiere un aspecto diferente del de sus análogas terrestres.**







**4. LOS EXPLORADORES DE MARTE padecerán algunas de las mismas desorientaciones visuales que los astronautas Apolo. Esta vista del cráter Gusev, tomada por el vehículo *Spirit* en el 147º día marciano de su misión muestra luz retrodifusa en torno a la sombra del mástil de la cámara. Los científicos a cargo del vehículo afirman que el polvo de la atmósfera marciana atenúa la luz y permite estimar las distancias mejor que en la Luna. La base de las colinas Columbia, que se ven al fondo, se halla a unos 500 metros.**

CORTESIA DE NASA/JPL (*panorámica de Marte y rocas marcianas*)

los aterrizadores Viking, hemos llegado a saber que las características geológicas marcianas dependen de influencias internas y externas.

A diferencia de la Luna, Marte posee una atmósfera tenue cuya presión a nivel del suelo es del orden del 1 por ciento de la presión en la Tierra a nivel del mar. La existencia de esa atmósfera cambia la sobreimpresión geológica que los exploradores tendrán que evaluar y penetrar para identificar, analizar e interpretar las rocas subyacentes. Esa atmósfera filtra e impide el paso a los meteoros y cometas más pequeños, los que forman cráteres de diámetro inferior a unos 30 metros. Por consiguiente, la superficie ya no está cubierta, como en la Luna, por un pulverizado creado por los impactos. Allí, el material predominante es polvo arrastrado por el viento. Es de origen vario: rocas erosionadas por el viento, desprendimientos de tierras, impactos y reacciones químicas. Forma unas dunas blandas que acaso los exploradores tendrán que evitar, muy parecidas a los ventisqueros que se forman en la Tierra en llanos y pasos montañosos.

Pese al efecto de filtrado de la atmósfera, en la estructura de la superficie y subsuperficie de la mayoría de las formaciones marcianas aún predomina la geología de impacto. Los primeros geólogos tendrán que descifrar las modificaciones que por eyección, fractura o choque sufren las rocas. Pero no todas las rocas tienen que ver con los impactos. En muchos valles fallados, así como en otras zonas, predomina la roca estratificada semejante a estratos sedimentarios o volcánicos. El regolito por impacto no es continuo y, tal como ha quedado patente con los vehículos *Spirit* y *Opportunity*, abundan afloramientos de formaciones de lecho de roca accesibles para su examen geológico normal o toma de muestras.

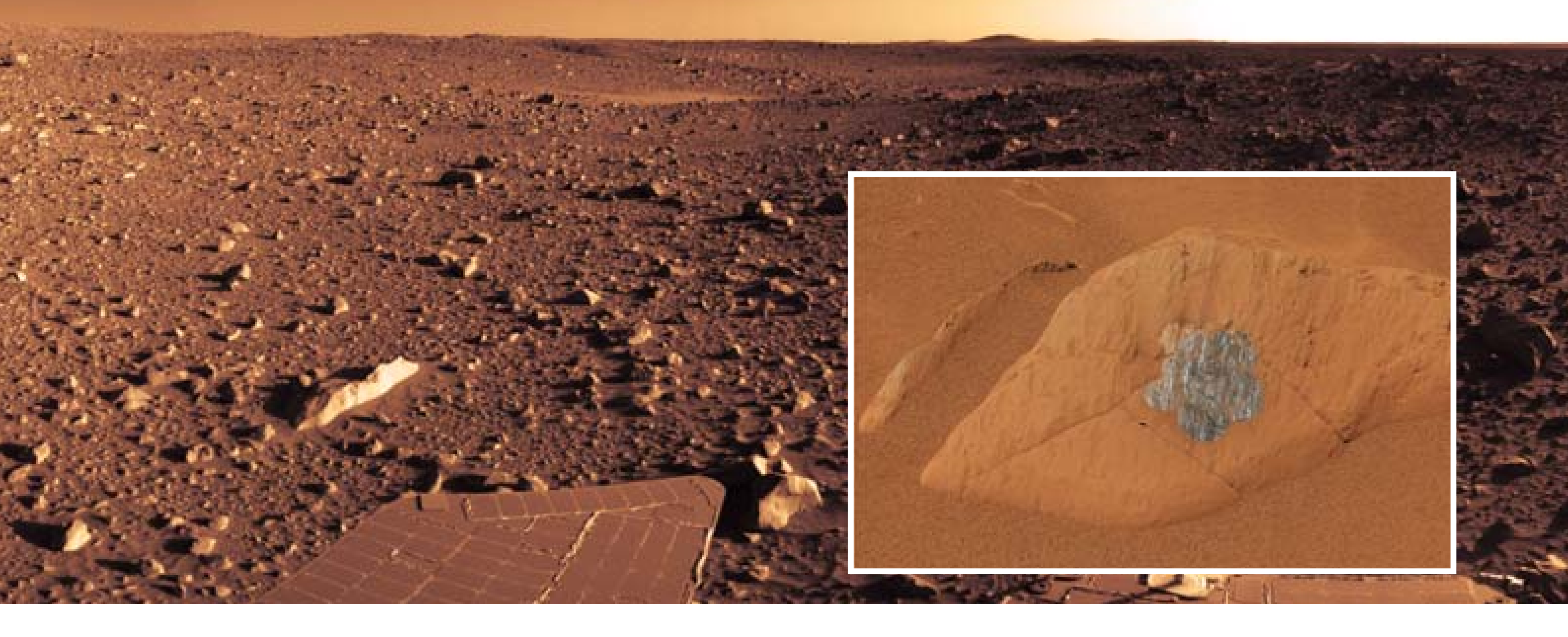
Mientras que la Luna es seca, en Marte el agua líquida talló formas y creó nuevos minerales. El examen de laboratorio de las muestras lunares no identificó en ellas ningún mineral acuoso, pero los sensores orbitales y los análisis robóticos de los minerales marcianos han detectado toda una variedad de arcillas que contienen agua, así como sales de azufre que seguramente se precipitaron desde agua. Más aún, a diferencia de la Luna, cuyas rocas contienen hierro metálico no oxidado, Marte posee extensos depósitos de hierro oxidado (hematita, $Fe_2O_3$), otro indicio de reacciones con agua [*véase* "Agua en Marte", por Jim Bell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2007; y "Estratigrafía y relieve de Marte", por Philip R. Christensen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 2005]. En el caso de Marte, los geólogos deben prepararse para interpretar un espectro de minerales mucho más amplio que el que encontramos en la Luna. El agua acarrea materiales. Abrió valles. Algunos impactos parecen haber fundido el hielo subsuperficial y generado así corrientes de lodo.

En resumen, el regolito marciano se compone por lo general de eyecciones de impacto y residuos de corrientes de fango o riadas, interestratificados con polvo arrastrado por el viento. En las regiones polares contiene, asimismo, agua y dióxido de carbono en forma de hielo o escarcha, tal como confirmó recientemente el aterrizador *Phoenix*. El regolito lunar no era ni con mucho tan complejo.

A consecuencia de esas diferencias con la Luna, en Marte al geólogo de campo le aguardan nuevas dificultades. Los exploradores aún seguirán necesitando una vista con rayos X; pero se parecerá más a la que precisan en la Tierra, donde hay que tener en cuenta el efecto del viento, de la gravedad o de los materiales arrastrados por el agua. En otros aspectos, la exploración podría ser más sencilla que en la Luna. Las imágenes de Marte muestran que, aunque sobre muchas rocas un polvo fino arrastrado por el viento forma un revestimiento poco grueso, a modo de pátina, el polvo limpia a menudo las superficies; las capas de polvo

## LAS DECADAS PERDIDAS

Harrison H. Schmitt lleva años sosteniendo que la cancelación del programa Apolo en 1972 fue un error gravoso; Michael Griffin, ex administrador —es decir, ex director— de la NASA, sostuvo la misma opinión en un texto de 2007. Si la NASA hubiera seguido con los medios creados por el programa Apolo y no hubiera optado por desarrollar un sistema completamente nuevo —la lanzadera espacial—, incluso los magros presupuestos de la época habrían dado para cuatro vuelos orbitales terrestres al año, ampliar la estación espacial Skylab e ir a la Luna dos veces al año. Con mejoras graduales, se podría haber llegado así a Marte. "De haber procedido de ese modo", escribió Griffin, "hoy estaríamos en Marte en vez de tener que estar diciendo ahora que será un asunto para 'los próximos 50 años'."



5. LAS ROCAS MARCIANAS, como las lunares, están revestidas de polvo y minerales erosionados. Hay que inspeccionar lo que hay debajo para identificar el tipo de roca. En el 99º día marciano de su misión, el vehículo *Spirit* empleó su útil abrasivo para raspar el revestimiento de esta roca, a la que se ha dado el nombre de Ruta 66.

no constituirán, pues, ningún impedimento de importancia para la identificación visual de rocas y minerales.

Una semejanza con la exploración lunar podría ser la distorsión visual. En el vacío, o en una atmósfera enrarecida, nuestro cerebro tiende a subestimar las distancias. Experimentamos el mismo fenómeno bajo la atmósfera nítida de los desiertos y montañas; la ausencia de objetos familiares, de casas, árboles, matas, postes eléctricos empeora las cosas. El primero en notar este efecto fue Neil Armstrong tras el aterrizaje de la *Apolo 11*. Aprendí a compensarlo comparando la longitud conocida de mi sombra con la que parecía ser y aumentando luego las distancias estimadas por mí en un 50 por ciento aproximadamente.

El polvo superficial le hace también jugarretas a la vista. En la Luna producía una intensa retrodifusión de la luz cuando se miraba dando la espalda al Sol. Este efecto, llamado "de oposición", que parece una mancha difusa y brillante, es el mismo fenómeno que vemos al mirar nuestra propia sombra sobre la nieve, o la sombra del avión en que viajamos sobre un bosque frondoso o un trigal. Lo verán los astronautas a Marte.

La retrodifusión arroja algo de luz sobre las sombras, mientras que las sombras que se ven mirando en la dirección del Sol sólo están iluminadas por un poco de luz que llega difusa desde otros elementos superficiales. Para cada fotografía teníamos que ajustar la apertura del diafragma con respecto a la línea de la posición solar. En las exploraciones futuras, las cámaras y sistemas de vídeo deberán poder ajustarse automáticamente a las condiciones de iluminación.

## Dificultad de acceso

Me sentí muy relajado en la Luna, cosa que atribuyo a mi fuerte motivación y a estar muy entrenado, sin olvidar la confianza en el equipo de apoyo en la Tierra. Pero nuestro satélite estaba a una distancia de sólo tres días y medio. Si se emplean cohetes químicos ordinarios, Marte se encuentra, en el mejor de los casos, a una distancia de ocho a nueve meses. Incluso con propulsión eléctrica o de fusión, que abrevia el viaje acelerando y decelerando continuamente la nave, el viaje durará meses [*véase* "Cómo ir a Marte", por George Musser y Mark Alpert; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2000]. Semejante aislamiento obligará a la tripulación marciana a desenvolverse con más independencia que las tripulaciones lunares.

Dicho esto, dudo que las cuestiones psicológicas llegaran a ser un problema grave. Un regreso a casa que dure un mínimo de varios meses, y no de dos a tres días, podría afectar de varios modos adversos a determinadas personas, pero los que exploraron la Tierra superaron pruebas peores. Históricamente, los aventureros sufrieron separaciones de su país equiparables a las de los primeros viajeros a Marte; además, carecían de todo medio de comunicación. Su motivación, preparación, confianza en el grupo e instinto de supervivencia serán prácticamente los mismos que los de los viajeros de las misiones Apolo. Todos estarán más que ocupados con el manejo y mantenimiento de la astronave, tareas científicas, ejercicios físicos, entrenamientos de simulación para tareas futuras, actualización de los planes de exploración y muchas otras obligaciones. De hecho, si la historia hasta hoy de los vuelos espaciales revela algo sobre este extremo, es que el mayor problema psicológico que aguarda a la tripulación sería el de disponer de tiempo personal para relajarse. Es algo que los planificadores deberán tener presente.

Lo mismo que lo fue en la Luna, la limitación primordial para la eficiencia de la exploración de Marte será el ineludible traje espacial presurizado. El traje Apolo 7LB que usamos en la exploración de Taurus-Littrow nos permitió ejecutar una notable cantidad

de trabajo de campo en un entorno muy hostil. El traje estaba presurizado a 0,26 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado, aproximadamente la cuarta parte de la presión atmosférica terrestre a nivel del mar. Con él habría podido correr a poco menos de diez kilómetros por hora a ritmo regular a lo largo de varios kilómetros, con un paso similar al de esquí de fondo. Con los útiles de que disponíamos y trabajando en equipo, pudimos recoger muestras, documentarlas fotográficamente y empaquetarlas a un ritmo razonable. En unas 18 horas de exploración reunimos unos 115 kilos de rocas y regolito. Desde luego que me habría gustado disponer de mejor movilidad en piernas, brazos y muñecas, pero la que nos proporcionó el A7LB resultó apropiada.

Lo que casi no funcionó, o al menos creó una fatiga y un trauma considerables en las manos, fueron los guantes del traje. Algo deberá hacerse con los guantes cuando regresemos a la Luna y sigamos hacia Marte. La flexibilidad de los dedos estaba limitada y el antebrazo se me cansaba al cabo de unos 30 minutos. Era como estar apretando sin cesar una pelota de tenis. Tras un período de descanso de ocho horas, no me quedaban trazas de dolor muscular, una señal de la mejor circulación cardiovascular bajo una gravedad de un sexto. Pero después de tres excursiones presurizadas de ocho a nueve horas, no estoy seguro de cuántas más habrían permitido las escoriaciones en las manos y los daños en las uñas que causaban aquellos guantes.

**Algo debe hacerse con los guantes. Se me cansaban los antebrazos al cabo de unos 30 minutos. Era como mantener continuamente apretada una pelota de tenis.**



6. **LOS GUANTES** que usó el autor en la superficie lunar.

La técnica de los trajes espaciales puede evolucionar en el sentido de que los guantes, o su equivalente, permitan una destreza que se aproxime a la natural de la mano y que el traje mismo conceda una movilidad como la de un traje de esquí de fondo [*véase* "Astronave monoplaza", por Glenn Zorpette; Investigación y Ciencia, agosto 2000]. Cabe pensar que asistentes de campo robóticos podrían ayudar a la planificación previa de los periplos. Además, con la experiencia de los astronautas que construyen la Estación Espacial Internacional disponemos ya de técnicas de preparación física que brindan un mejor acondicionamiento de los músculos de los brazos a unas manos sometidas a esfuerzos continuos. Otros procedimientos y equipos nuevos podrían mejorar el rendimiento de la exploración.

## Formar una tripulación

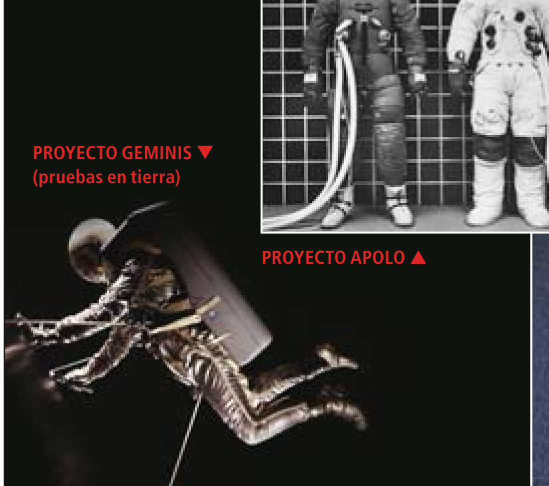
La urgencia política y una planificación y desarrollo iniciales del proyecto Apolo basados en los vuelos de prueba dejaron pocos resquicios para seleccionar geólogos de campo e integrarlos en las tripulaciones lunares. La NASA eligió pilotos profesionales de pruebas y pilotos militares, y un solo geólogo de campo, pero que tenía formación de piloto (el autor). Todos los tripulantes debían poseer habilidad, experiencia y seguridad en el uso de las máquinas y procedimientos de vuelo. No quedaba sitio para un geólogo de campo como "pasajero".

Tal situación debería cambiar cuando se vuelva a la Luna, dentro de un decenio más o menos. En todos los equipos enviados al satélite deberían figurar exploradores de campo profesionales para que adquieran experiencia con vistas a la exploración de Marte. Tal como se hizo en las últimas misiones Apolo, todos los miembros de la tripulación y sus equipos de apoyo operativo tendrían que recibir el mayor entrenamiento de campo posible sobre problemas geológicos reales. El número óptimo de miembros de la tripulación para la exploración inicial parece que es cuatro: dos pilotos profesionales con entrenamiento secundario como exploradores de campo e ingenieros de sistemas, tal y como ocurría en las tripulaciones lunares del programa Apolo; un geólogo de campo profesional con formación complementaria como piloto, ingeniero de sistemas y biólogo de campo; y un biólogo de campo profesional con formación complementaria como médico y geólogo de campo.

Con la formación complementaria, el éxito de la misión no depende de una persona concreta, sino del trabajo en equipo. Además de estar completamente preparado para contribuir con su especialidad al conjunto del equipo,

## UN TRAJE ESPACIAL PARA

Trabajar cuando se lleva puesto un traje espacial es más que penoso. Para que los astronautas respiren deben estar presurizados, pero la presión los rigidiza y restringe la movilidad. Los




CORTESIA DE NASA (*guantes de Schmitt*); RALPH MORSE *Getty Images* (*Geminis y Apollo*); ROGER RESSMEYER *Corbis* (*transbordador espacial y AX-5*); CORTESIA DE NASA (*programa Constelación*)

CADA OCASION




astronautas del Apolo tuvieron que ejercitarse intensamente para acostumbrarse a trabajar con los trajes puestos. Los trajes futuros podrían ser más flexibles.

cada miembro de una misión marciana debe sentirse total e inquebrantablemente cómodo y compatible con una estructura jerárquica de mando. Históricamente, pequeños grupos de exploradores alcanzaron grandes éxitos cuando había inequívocamente un líder experimentado.

La exploración de Marte será distinta de la lunar en muchos aspectos. Primero, como la travesía se medirá en meses y no en días, durante toda ella la tripulación tendrá que seguir practicando el aterrizaje y otros procedimientos de vuelo. En las misiones Apolo, el aterrizaje lo ensayábamos con un simulador en tierra; el último ejercicio lo hicimos pocos días antes del lanzamiento, cuando faltaba menos de una semana para nuestro descenso propulsado sobre la Luna. En los periplos a Marte, el lapso entre el lanzamiento y el aterrizaje sería del orden de nueve meses, demasiado largo sin entrenamiento regular a bordo.

Segundo, el control desde tierra no podrá llevar a cabo las habituales funciones de control de misión a causa del retardo en las comunicaciones (hasta 22 minutos, en cada sentido). En la Tierra tendrán que realizarse, en cambio, actividades que no requieran interacción directa con la tripulación; a saber, análisis y síntesis de datos, planificación semanal, monitorizado y análisis de sistemas y consumibles, planificación del mantenimiento y estudio de situaciones posibles.

En la realidad, las funciones de control directo de la misión tendrán que realizarlas los propios astronautas. Por ejemplo, la misión podría componerse de dos tripulaciones, una que aterriza y otra que permanece en órbita para actuar como centro de control en órbita de la misión. Cuando la primera vuelve a la órbita, la segunda desciende y explora una nueva zona.

Ese grado de autonomía no carece de precedentes. Incluso durante las misiones Apolo, aunque habíamos planeado las actividades de exploración lunar antes del lanzamiento valiéndonos de las fotografías disponibles, la NASA dejaba bastante iniciativa a las tripulaciones para que aprovecharan oportunidades inesperadas.

Por ejemplo, a finales del segundo período de exploración del *Apolo 17*, descubrí vidrio volcánico naranja en la cresta el cráter Shorty, con sólo un margen de 30 minutos para trabajar en aquel lugar. Sin esperar las sugerencias del control de la misión, Gene y yo empezamos a describir y fotografiar el depósito y a recoger muestras. No teníamos tiempo para tratar del asunto con los controladores, pero supimos de inmediato lo que debía hacerse.

Exactamente así deberán plantearse siempre las cosas las tripulaciones a Marte, con un control de misión en la Tierra que tendrá noticia de los hechos al cabo de decenas de minutos.

Una tercera diferencia respecto de las misiones Apolo es que, a la luz de los gastos y de la importancia histórica de cada una de las misiones de exploración a Marte, éstas deben encaminarse al éxito. Si algo sale mal, los astronautas aún deberían ser capaces de proseguir la misión y alcanzar sus objetivos principales.

Lo idóneo sería, en efecto, que la nave transporte dos aterrizadores por si uno no pudiera emplearse. Más aún, si durante la secuencia de entrada, descenso y aterrizaje hay alguna incidencia en los sistemas o en los programas informáticos, los astronautas deben poder llegar, pese a todo, a suelo, en vez de abortar la operación y quedarse en órbita, como ocurría en las Apolo. Los problemas pueden resolverse con tiempo, consultando con la Tierra, una vez que la tripulación aterrice sin novedad en Marte.

Los más jóvenes disfrutarán en su día del privilegio y de la aventura de la exploración de Marte si sus padres y abuelos les brindan la oportunidad. No será fácil. Como en todo lo que algo vale, hay riesgos. La curiosidad, las lecciones de la historia y nuestro propio instinto de conservación nos demandan que marchemos hacia nuestro exterior.

## Bibliografía complementaria

EXPLORING TAURUS-LITTROW (WHAT IS IT LIKE TO WALK ON ANOTHER WORLD?). Harrison H. Schmitt en *National Geographic*, vol. 144, n.º 3, págs. 290-307; septiembre, 1973.

A TRIP TO THE MOON. Harrison H. Schmmitt en *Where Next, Columbus?: The Future of Space Exploration*. Dirigida por Valerie Neal. Oxford University Press, 1994.

APOLLO 17 AND THE MOON. Harrison H. Schmitt en *Encyclopedia of Space Science and Technology*. Dirigido por Hans Mark. Wiley, 2003.

RETURN TO THE MOON. Harrison H. Schmitt. Springer-Praxis, 2006.

DECODING THE MINERAL HISTORY OF MARS. Vivien Gornitz en *Mineral News*, vol. 24, n.º 2, págs. 12-13; febrero, 2008.

PAPER ASTRONAUT: THE PAPER SPACECRAFT MISSION MANUAL. Juliette Cezzar. Presentación de Buzz Aldrin. Universe, 2009.

# Nuevas tácticas contra bacterias resistentes

## Se están aplicando enfoques y técnicas de nuevo cuño en la búsqueda de antibióticos

Christopher T. Walsh y Michael A. Fischbach

"Superbicho ataca". Parece el título de una película infantil de terror. Se trata, en realidad, de un titular del *New York Post* del 26 de octubre de 2007. Doce días antes, había muerto en Brooklyn un chico de 12 años, tras herirse jugando al baloncesto, infectado por una cepa de la bacteria *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM), uno de los fármacos más potentes del arsenal antibiótico actual.

Diez años atrás, la posibilidad de que una persona sana contrajese una infección bacteriana letal se hubiera considerado remota. Pero en nuestros días se ha hecho realidad. En 2007, un equipo dirigido por Monina Klevens, de los Centros estadounidenses de Prevención y Control de Enfermedades, informaba que la cepa SARM era responsable de 19.000 muertes al año en los EE.UU., mortandad superior a la causada por el sida. La cifra resulta especialmente alarmante debido a que un 20 por ciento de quienes contraen infecciones no localizadas de SARM fallecen por esa causa; asimismo, un número cada vez mayor de las víctimas son personas jóvenes y sanas que contraen la infección durante sus actividades cotidianas. El problema estuvo otrora limitado a hospitales y residencias de ancianos, donde muchas personas eran vulnerables en razón de su debilitado sistema inmunitario. A los que sobreviven al SARM, les sale también caro: un enfermo que lo contraiga mientras se encuentra hospitalizado permanece ingresado 10 días más por término medio, a un coste de unos 25.000 o 30.000 euros.

El gasto anual total correspondiente al tratamiento de infecciones SARM en los hospitales estadounidenses supera los 3000 millones de euros. Y el estafilococo áureo es sólo uno de los patógenos que están resultando cada vez más difíciles de doblegar. La medicina moderna está perdiendo la guerra contra bacterias morbosas que en otros tiempos se dieron por vencidas. Para invertir la marea se requieren nuevos métodos que permitan descubrir y crear nuevos antibióticos.

### Resistencia recurrente

La historia de la SARM nos enseña cuán rápidamente puede presentarse la resistencia a los fármacos. Los mecanismos responsables de la resistencia antibiótica de los estafilococos y otras bacterias hacen que el problema sea casi inevitable y crean una necesidad incesante de antibióticos nuevos.

La meticilina, un derivado de la penicilina, fue introducida en 1959 para tratar infecciones provocadas por cepas bacterianas que se habían vuelto resistentes a la penicilina (*S. aureus* y *Streptococcus pneumoniae*, el estreptococo de la neumonía). No obstante, tan sólo un año después se observaron en hospitales europeos cepas de *S. aureus* resistentes a la meticilina. En los años ochenta, las SARM se difundieron

#### CONCEPTOS BASICOS

- Hay bacterias que desarrollan resistencia contra los antibióticos a una velocidad superior a la de creación o descubrimiento de nuevos fármacos.
- Para solucionar el problema, se están adoptando estrategias novedosas; entre otras, la exploración de ambientes exóticos y el análisis de genomas microbianos.
- Ciertos métodos nuevos y específicos contra microorganismos y fármacos que inutilizan el patógeno sin matarlo podrían eludir o frenar una espiral de progresiva resistencia.

por los servicios de salud de todo el mundo. Hace unos 15 años surgió una clase nueva de infecciones SARM: infecciones contraídas en la "comunidad", no sólo en hospitales.

El tratamiento de la estafilococia resistente a la meticilina (SARM) resulta problemático debido, en parte, a que puede difundirse con prontitud si penetra en el torrente circulatorio. Pero la cualidad más perniciosa de la SARM es su resistencia frente a unos de los antibióticos principales, los beta-lactamos (cefalosporinas y variantes de la penicilina, entre otros): los estafilococos producen una enzima que escinde y destruye los fármacos. La resistencia a los beta-lactamos limita el arsenal farmacológico disponible contra la SARM a un pequeño conjunto de antibióticos con efectos secundarios graves. Ciertas cepas de SARM han adquirido ya resistencia frente a la vancomicina, el más eficaz de los antibióticos mencionados.

La aparición de resistencia a la vancomicina en bacterias que ya eran resistentes a la meticilina ilustra un difícil problema al que se enfrentan la medicina y la farmacopea: desde el momento en que se introduce un antibiótico en la práctica clínica, empieza la cuenta atrás de su vida útil. La responsabilidad recae en la selección natural: la mera presencia de un antibiótico crea un ambiente donde una cepa bacteriana que por azar sea resistente adquirirá súbitamente ventaja sobre sus competidoras para desarrollarse más.

La vancomicina fue aprobada por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) en 1958; al presentarse la SARM, la vancomicina se convirtió en la fuerza terapéutica de reserva para esta clase de infecciones. Pero en 2002 empezaron a aparecer, en los hospitales, cepas de SARM que oponían también resistencia a la vancomicina. Las cepas de *S. aureus* vancomicín-resistentes (SAVR) emergieron de cepas de SARM que habían adquirido un conjunto de cinco genes que viajaban en bloque, los cuales confirieron resistencia a la vancomicina. Las enzimas codificadas por esos genes permiten al SAVR reemplazar las dianas de la vancomicina en la pared bacteriana por una estructura variante, a la que la vancomicina no puede unirse. El que llegó a denominarse "antibiótico de último recurso" deja entonces de inhibir el desarrollo de SAVR.

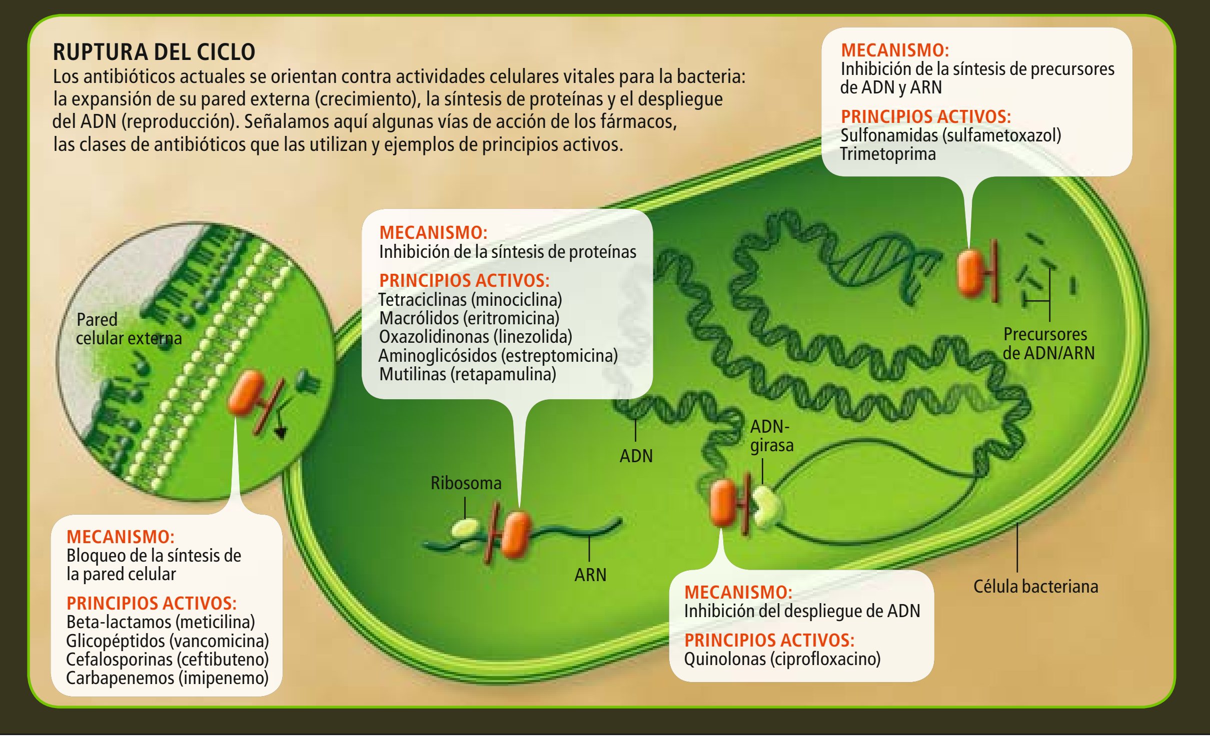
La sustitución de la diana de un antibiótico constituye sólo una de las tres estrategias principales que las bacterias adoptan para evitar la muerte. Otra estrategia se funda en el ataque del antibiótico: numerosos genes de resistencia (como el responsable de que SARM se torne resistente a los beta-lactamos) codifican una enzima que destruye o altera al antibiótico, y lo torna ineficaz. Una tercera posibilidad consiste en la expulsión del fármaco: ciertos genes codifican las instrucciones para una bomba que se instala en la membrana celular y excreta las moléculas de antibiótico que penetran en

PETER Y MARIA HOEY



# MECANISMOS ANTIBIOTICOS ACTUALES...

**Los antibióticos típicos de la farmacopea actual tratan de vencer a las bacterias impidiendo alguna de sus funciones vitales. Las bacterias, a su vez, cuentan con varios medios para destruir los fármacos o eludir su acción.**




la bacteria, evitando así que la concentración de antibiótico en el soma celular sea suficiente para provocar la muerte de esa célula.

¿En dónde se originan esos genes de resistencia? Algunos son fruto de mutaciones aleatorias. Este es el caso del alelo que reemplaza la enzima diana del ciproflaxino y de otros antibióticos basados en fluoroquinolonas por una forma resistente de esa misma enzima. Otros se toman de bacterias afines: el conjunto de cinco genes que confiere resistencia a la vancomicina procede de una bacteria que fabrica ese antibiótico. Esa bacteria necesita esos genes para protegerse de su propio armamento químico; es probable que otras hayan adquirido esa misma defensa mediante transferencia génica horizontal (intercambio de genes).

Con frecuencia, dichas transferencias se vehiculan a través de plásmidos (fragmentos circulares de ADN), que se comportan como virus sin cápside; se transfieren de una bacteria a una célula bacteriana hospedadora, que los reconoce como pieza nativa de su ADN y los copia mediante su maquinaria de replicación. Para facilitar su difusión, los plásmidos también portan genes que promueven la supervivencia del huésped, entre ellos, genes de resistencia a los antibióticos. En bacterias que moraban en una planta de tratamiento de residuos se descubrió un plásmido que codificaba nueve genes de resistencia a los antibióticos.

La transferencia horizontal de genes se ha observado también al aislarse las cepas SARM, SAVR y una tercera bacteria, *Enterococcus faecalis*, de un paciente de diálisis de Michigan, en 2002. El análisis genético de esas cepas hizo ver que un plásmido que contenía el conjunto génico de resistencia a la vancomicina (así como genes de resistencia a otros tres antibióticos y a cierta clase de desinfectantes) se habían transferido de *E. faecalis* a SAVR, creando así una cepa nueva de SAVR.

Lamentablemente, no es insólito que un enfermo crónico se vea coinfectado por dos patógenos bacterianos que hacen surgir un tercero. Dado que en las unidades de cuidados intensivos y en las residencias de tercera edad recalan a menudo pacientes de sistema inmunitario frágil, que reciben tratamientos antibióticos intensos, es allí donde más se desarrollan bacterias resistentes a los antibióticos. Sin saberlo, el personal sanitario facilita la propagación de las bacterias al ir de un paciente a otro para cambiar sondas o catéteres intravenosos; por esa razón, el cumplimiento de las normas sobre la higiene de las manos del personal hospitalario, mientras pasan de un paciente a otro, reduce el número de infecciones.

SAVR, que no ha alcanzado todavía una gran difusión, muestra sensibilidad a una cuantía limitada de antibióticos de uso clínico; la mortalidad en los infectados es elevada. Está surgiendo otra clase de patógenos, las bacterias gram-negativas panresistentes a fármacos, cuyo perfil de resistencias es todavía más amedrentador. Cuentan con dos membranas celulares;

## Los autores

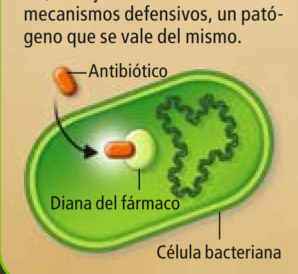

**Christopher T. Walsh** ocupa la cátedra Hamilton Kuhn de bioquímica y farmacología molecular en la facultad de medicina de Harvard. Centra su investigación en los mecanismos que usan los microorganismos para sintetizar antibióticos y otras moléculas de interés terapéutico. **Michael A. Fischbach** trabajaba en el departamento de biología molecular del Hospital General de Massachusetts cuando empezó a colaborar con Walsh en la búsqueda de genomas microbianos, para detectar genes productores de antibióticos. En la actualidad es profesor en el departamento de bioingeniería y ciencias terapéuticas de la Universidad de California en San Francisco.


TAMI TOLPA (*ilustraciones de ambas páginas*)

## ...Y LAS DEFENSAS FRENTE A ELLOS

### TACTICAS DE RESISTENCIA

Las bacterias, sea por una mutación genética o por apropiación de un gen procedente de otro organismo, adquieren resistencias a los antibióticos. Las tres formas de resistencia habituales consisten en el despliegue de una enzima que destruye o inutiliza el fármaco antibiótico; el uso, en la pared celular, de una bomba que excreta el fármaco antes de que pueda actuar, y, por fin, la sustitución de la proteína diana del fármaco por una variante que el fármaco no reconoce. Se muestra, debajo de cada uno de estos mecanismos defensivos, un patógeno que se vale del mismo.



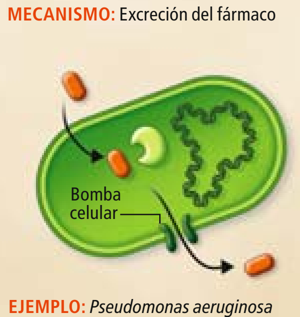

**MECANISMO:** Destrucción del fármaco



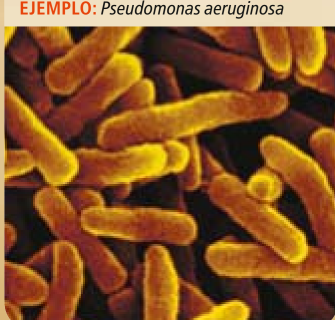

**EJEMPLO:** *Escherichia coli*



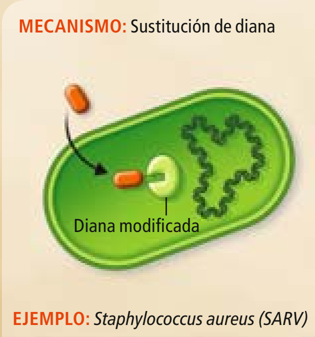
**MECANISMO:** Excreción del fármaco




**EJEMPLO:** *Pseudomonas aeruginosa*



**MECANISMO:** Sustitución de diana




**EJEMPLO:** *Staphylococcus aureus* (SARV)



GARY GAUGLER *Photo Researchers, Inc. (E. coli)*; STEM JEMS *Photo Researchers, Inc. (P. aeruginosa)*; CORTESIA DE JANICE HANEY CARR *Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (S. aureus)*

la membrana externa adicional impide que numerosos antibióticos penetren la célula.

Entre los patógenos gram-negativos que son resistentes a casi todos los antibióticos mencionemos *Escherichia coli*, que contamina los alimentos, otra emparentada con ésta, *Klebsiella pneumoniae*, y dos bacterias oportunistas, *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter baumannii*, responsables de neumonía, meningitis y bacteremia en pacientes hospitalarios cuyo sistema inmunitario se encuentra debilitado.

El personal sanitario debe hacer todo lo posible para evitar la difusión de bacterias resistentes —y, por ende, de genes de resistencia— dentro y fuera del hospital. Por otra parte, son necesarios antibióticos nuevos para complementar esos esfuerzos y combatir los gérmenes que ya han adquirido resistencia.

Entre las postrimerías de los años treinta y los primeros sesenta del siglo pasado, el descubrimiento de antibióticos experimentó una "edad de oro": se desarrollaron los principales tipos de antibióticos que se utilizan en la actualidad. Desdichadamente, en los cuatro decenios que median entre el lanzamiento de las quinolonas (1962) y la aprobación de las oxazolidinonas (2000) se ha producido un hiato en la innovación, durante el cual no se han desarrollado nuevas clases de antibióticos.

Una de las causas de semejante sequía reside en las compañías farmacéuticas, que han perdido incentivo económico para invertir en la investigación de antibióticos; requiere un gran esfuerzo y los márgenes de beneficio son escasos, en comparación con los de medicamentos para tratamientos de larga duración como antihipertensivos y antiinflamatorios. Otra de las causas estriba en que los antibióticos actuales fueron descubiertos mediante técnicas que están ya agotadas; el hallazgo de otros nuevos va a requerir nuevos enfoques.

### INNOVACION EN ANTIBIOTICOS

En 1962 se recogió el último fruto de los métodos tradicionales de hallazgo de principios activos; no se descubriría ninguna otra clase de antibiótico durante los próximos 40 años. Las introducidas en estos últimos años fueron descubiertas hace decenios, pero no fueron desarrolladas en su tiempo.




## Búsqueda y síntesis

Casi todos los antibióticos actuales son producidos por bacterias u hongos. Se obtienen también por modificación química de esos antibióticos naturales. Los microorganismos esgrimen sus antibióticos unos contra otros, en una suerte de "guerra química"; puede que los segreguen también, en concentraciones menores, como moléculas de señalización. Tradicionalmente, la búsqueda de antibióticos naturales ha consistido en aislar microorganismos, buscándolos, a menudo, en muestras de suelo, y cultivarlos después en el laboratorio para extraer sus secreciones. Se ensayan estos compuestos enfrentándolos a bacterias patógenas, lo que permite cribar las moléculas con potencial terapéutico. Las compañías farmacéuticas han estudiado de esa forma millones de extractos bacterianos. En el mercado hay sólo unas 10 clases de antibióticos naturales. Se han descubierto otras, pero, por razones diversas (actividad antibacteriana débil o toxicidad inaceptable), nunca se han prescrito de forma generalizada.

# MINERIA GENETICA Y FARMACOS

**Casi todos los antibióticos actuales son producidos por bacterias; en condiciones naturales, éstas mantienen una guerra química contra microorganismos rivales. Mediante la secuenciación de genomas y la manipulación de genes podrían descubrirse nuevas armas químicas o modificar las existentes para mejorar su eficacia.**

### REBUSCA DE GENES

Las bacterias producen ciertos antibióticos naturales mediante cadenas de montaje de enzimas agrupadas en módulos, que van añadiendo cada uno componentes sucesivos. Las enzimas están codificadas por conjuntos de genes. Una posibilidad consiste en explorar genomas completos de un gran número de cepas bacterianas, para localizar grupos de genes susceptibles de crear antibióticos nuevos. No todos esos bloques de genes se encuentran activos en las células, por lo que la única forma de identificar esos antibióticos "crípticos" consiste en rebuscar por el genoma.

Módulo enzimático
Subunidad química
Molécula de antibiótico
Genes codificadores de enzimas
ADN

### TRASLACION DE GENES

Si un compuesto antibiótico recién descubierto se halla "durmiente" en su bacteria nativa o se produce en cantidades tan reducidas que el microorganismo no sirve como "fábrica" del fármaco, puede transferirse la secuencia génica que codifica las enzimas necesarias e insertarla en organismos más cooperativos.

Bacteria nativa
Productor prolífico

### MODIFICACION DE GENES

Puede modificarse un compuesto con el fin de que venza la resistencia bacteriana: basta con modificar por ingeniería genética el organismo que lo produce para que éste utilice nuevos módulos enzimáticos. En una serie de experimentos se mezclaron y armonizaron genes para obtener 50 variantes del núcleo de la molécula de eritromicina que pudieran originar nuevas versiones de la misma.




Esta metodología funcionó a la perfección durante la edad de oro del descubrimiento de antibióticos. Pero todos los frutos que estaban al alcance de la mano ya se han recolectado. A pesar de los continuos esfuerzos de los laboratorios farmacéuticos durante los últimos 50 años, ha caído la cadencia de descubrimientos. Una de las causas más irritantes es el redescubrimiento: dado que la mayoría de los microorganismos productores de antibióticos forman esporas que viajan por todo el planeta y que los genes responsables de la producción de antibióticos están expuestos a la transferencia horizontal (igual que los genes de resistencia a los mismos), son muchos los microorganismos que producen un mismo antibiótico. Se estima que una de cada 250 cepas del orden de las bacterias más explotadas en la obtención de antibióticos (actinomicetes) produce tetraciclina.

A pesar de que esta elevada proporción de redescubrimiento ha llevado a algunos investigadores a concluir que se ha agotado "la veta madre" de antibióticos, análisis genéticos recientes de bacterias han puesto sordina a semejante conclusión. Sugieren, en cambio, la necesidad de aplicar nuevas tácticas.

Por otra parte, no es raro que los progresos técnicos susciten el renacer de alguna disciplina antigua; parece que el descubrimiento de antibióticos se encuentra en los albores de ese renacer. Las estrategias actuales para el desarrollo de antibióticos se basan en la modificación de los ya existentes o en el descubrimiento de otros completamente nuevos. La modificación química de antibióticos naturales proporciona antibióticos "semisintéticos", con la "carga explosiva" intacta y la periferia modificada. Hallamos un ejemplo en las tetraciclinas, antibióticos que inhiben la actividad de los ribosomas. La resistencia a las tetraciclinas suele deberse a un sistema de bombeo en la membrana de la célula bacteriana que las excreta antes de que puedan realizar su tarea. Tal fenómeno se ha convertido en un problema grave en el caso de bacterias gram-negativas panresistentes.

Los científicos de Wyeth han sintetizado una tetraciclina químicamente modificada, la tigeciclina, que ya no puede ser bombeada al exterior de las células diana. La tigeciclina, aprobada por la FDA en 2005, se indica contra cierta variedad de patógenos resistentes a la tetraciclina, si bien su uso se halla restringido a medios hospitalarios porque requiere administración intravenosa. Pero las cosas comienzan a torcerse: se ha observado ya resistencia a la tigeciclina en algunas cepas de *A. baumannii*. El tiempo dirá a qué velocidad se expande la resistencia al nuevo fármaco.

La modificación de un principio activo de producción microbiana (penicilina, vancomicina, eritromicina) también puede llevarse a cabo mediante la introducción de alteraciones genéticas en el microorganismo que lo fabrica. Casi todos los organismos sintetizan antibióticos

## ANTIGRIPALES

**Los antibióticos son inocuos para virus como la nueva cepa gripal A (H1N1, *abajo*), pero en la hipótesis de que este virus nuevo provocase una pandemia, es probable que los fallecimientos se debieran a infecciones bacterianas secundarias, causantes de neumonías.**
**La gripe debilita las defensas del infectado, que queda expuesto al ataque de bacterias oportunistas. Cuando el *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina u otras bacterias resistentes provocan la neumonía, empeora una dolencia que era ya grave, resulta más difícil de tratar y puede convertirse en letal.**



TAMI TOLPA (*ilustración*); C. S. GOLDSMITH Y A. BALISH *Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (H1N1)*

naturales mediante enormes cadenas de montaje integradas por equipos de enzimas (“módulos”): cada uno inserta un bloque constructivo en la preparación de la molécula de antibiótico. Mediante alteraciones genéticas que modifican determinados módulos enzimáticos, se induce en esos organismos la producción de principios activos que se diferencien en un bloque constructivo ubicado en una posición concreta. Kosan, una compañía de biotecnología adquirida en fecha reciente por Bristol-Myers Squibb, ha aplicado esta forma de ingeniería genética programada al objeto de generar docenas de derivados de la eritromicina, difíciles de obtener mediante los métodos de síntesis habituales.

A pesar de que la modificación de antibióticos conocidos ha constituido una estrategia fructífera, importaría más el descubrimiento de clases de antibióticos enteramente nuevas, ya que es menos probable que sufran un rápido incremento de resistencias, auténtica plaga de las sucesivas generaciones de antibióticos existentes.

## Minería genómica

En años recientes, la investigación se ha orientado sobre todo hacia la identificación de enzimas esenciales para el metabolismo bacteriano, con la esperanza de que en las bibliotecas de compuestos químicos figuren ya moléculas inhibidoras de estas enzimas vitales, aptas para su conversión en fármacos. Antes de embarcarse en la búsqueda del inhibidor correspondiente, se determina el efecto que tendría sobre la bacteria la pérdida de la enzima. Una vez descifrado el genoma bacteriano (la secuencia completa de código ADN), se silencian los genes codificadores de ciertas enzimas, para ver si la bacteria sobrevive sin ellas.

Aunque esa estrategia de identificación de dianas enzimáticas no ha aportado nuevos antibióticos, es posible que dé frutos en años venideros. Entre las principales dificultades se cuenta la formidable barrera alzada por la pared celular bacteriana: aun cuando se descubriera una molécula de tamaño reducido con capacidad para inhibir una enzima bacteriana clave, de poco serviría si no alcanzara su objetivo intracelular. En lugar de buscar puntos flacos en los patógenos, otra forma de hallar nuevos antibióticos consiste en estudiar microorganismos productores de antibióticos. La genómica, también en este caso, resultará de gran utilidad.

Cuando en 2002 se obtuvieron los primeros genomas de bacterias productoras de antibióticos, se planteó un intrigante misterio: esos microorganismos, pertenecientes a la clase de los actinomicetes, contaban con 25 o 30 juegos de genes que, de acuerdo con su secuencia, parecían corresponder a instrucciones de montaje de módulos enzimáticos productores de moléculas de tipo antibiótico; sin embargo, las bacterias no parecían utilizar la mayoría de esos genes. Cultivadas en el laboratorio, sintetizaban sólo una o dos de tales moléculas.

Para verificar si esos genes, en apariencia durmientes, codificaban maquinaria para la fabricación de antibióticos nuevos, los autores, juntamente con varios colaboradores de la facultad de medicina de Harvard y del Instituto Broad, han acometido la secuenciación del genoma de otras 20 cepas más de actinomicetes y la aplicación de algoritmos informáticos refinados para seleccionar genes que pudieran contener instrucciones para módulos enzimáticos productores de antibióticos. El estudio de las secuencias genómicas que rodean esos módulos contribuiría a descifrar los mecanismos reguladores que utilizan las células para deter-

## BUSQUEDA EXHAUSTIVA

**Las bacterias del suelo resultaron ser tan caudalosa fuente de principios activos durante la era inicial de descubrimiento de los antibióticos, que pocos han explorado más allá. La búsqueda de compuestos novedosos en ambientes y organismos distintos de los considerados hasta ahora está arrojando moléculas antibióticas cuyos mecanismos difieren en grado suficiente de las clases de fármacos actuales para evitar la aparición de resistencias.**



### ORGANISMOS MARINOS

Los ambientes extremos constituyen buenos lugares donde buscar productores de compuestos insólitos, porque los organismos que allí medran afrontan condiciones y amenazas exóticas. La abisomicina, un nuevo y potente antibiótico, es elaborado por la bacteria *Verrucosispora* (en cultivo, *izquierda*, y en espora, *derecha*), que habita en el mar del Japón a una profundidad de casi 300 metros.

### MICROORGANISMOS MUTUALISTAS

La cooperación conduce a la especialización; por eso, los participantes en relaciones mutualistas producen moléculas altamente especializadas. Un hongo que habita en un escarabajo descortezador, endémico del sur de EE.UU., le ayuda a digerir la pulpa de madera. A cambio, el escarabajo hospeda a una bacteria que produce un potente agente antifúngico, que mata a los hongos competidores, pero no al hongo mutualista del escarabajo.





### PRODUCTORES NO COOPERANTES

Aunque ciertas bacterias son fecundas productoras de nuevos antibióticos, no se prestan a crecer en condiciones industriales o en el laboratorio. *Stigmatella aurantiaca* (*izquierda*) genera una molécula de tipo antibiótico, la mixocromida, que no se presta al cultivo. Con nuevos medios para trasladar los genes de interés a productores mejor dispuestos, podrían investigarse familias de bacterias, obviadas hasta ahora, en busca de moléculas útiles.

CORTESIA DE RODERICH SÜSSMUTH Y HANS-PETER FIEDLER (*Verrucosispora*); CORTESIA DE USDA FOREST SERVICE (*escarabajo*); DAVID WHITE, COLOREADO POR YVES BRUN, PORTADA DE *JOURNAL OF BACTERIOLOGY*, VOL. 185, N.º 4; FEBRERO DE 2003 (*S. aurantiaca*)

minar cuándo debe sintetizarse un antibiótico. Con esa información, podemos manipular las células mediante ingeniería genética para activar los genes deseados y ver si las moléculas crípticas muestran actividad antibiótica.

Por otra parte, un grupo de investigadores de la Universidad de Saarland, en lugar de esforzarse en inducir a las bacterias la producción de antibióticos bajo demanda, ha optado por trasladar los genes productores de antibióticos desde sus recalcitrantes productoras a bacterias de otros tipos, más indicadas para la manufactura de antibióticos.

Rolf Müller y sus colaboradores trabajan con mixobacterias, un orden de bacterias que, al igual que los actinomicetes, son productoras prolíficas de antibióticos. Sin embargo, dado que el cultivo en el laboratorio de mixobacterias entraña mayor dificultad que el de los actinomicetes, se ha trabajado para cribar de entre ellas las productoras de antibióticos novedosos.

Müller ha eludido este problema mediante la escisión de los genes implicados en la producción de mixocromida, una molécula de tipo antibiótico, a partir de la mixobacteria *Stigmatella aurantiaca* e insertándolos en *Pseudomonas putida*, cepa bacteriana más sencilla de cultivar. De hecho, *P. putida* se utiliza a menudo para la producción comercial de enzimas útiles en la industria. El trabajo de Müller ha afrontado dos dificultades clave: el hallazgo de un hospedador genéticamente manipulable dotado de la infraestructura metabólica requerida para la producción de antibióticos y el desarrollo de técnicas para desplazar de un microorganismo a otro grandes fragmentos de ADN. Ello ha abierto la cueva del tesoro para nuevos antibióticos procedentes de mixobacterias y sugiere la necesidad de una secuenciación genómica a gran escala de las mixobacterias.

Además de estudiar microorganismos del suelo infrautilizados, los investigadores pueden dirigir su atención hacia ecosistemas inexplorados. No es mala opción, si consideramos que resulta más probable que los antibióticos creados por organismos de ambientes exóticos no se hayan descubierto todavía.

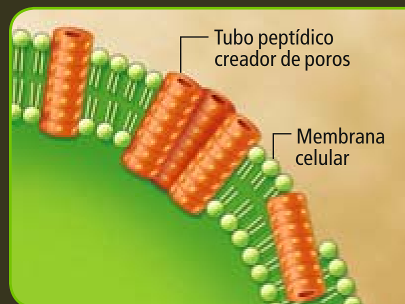
En la Universidad de Tübingen, el equipo que dirige Roderich Süssmuth acaba de lograr un hallazgo: en un actinomicete aislado de un sedimento yacente a una profundidad de 289 metros del mar del Japón han encontrado un nuevo antibiótico, la abisomicina.

Otro grupo que estudia bacterias marinas (Bradley Moore, William Fenical y sus colaboradores de la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, California) ha secuenciado el genoma de cepas de actinomicetes marinos, anteriormente desconocidas. Los genomas presentan un abanico de genes correspondientes a antibióticos y a moléculas relacionadas, lo que demuestra el potencial de las bacterias marinas para la preparación de nuevas clases de antibióticos.

Otra metodología de prospección de nuevos ambientes consiste en estudiar microorganismos que participan en sistemas de mutualismo (interacciones en las que ambas partes resultan beneficiadas). El escarabajo descortezador *Dendroctonus frontalis* porta consigo un hongo que digiere el interior de los pinos invadidos por el insecto. La protección que el escarabajo proporciona a su fúngico mutualista frente a un segundo linaje de hongos antagonistas, que compite con el primero, ha sido un misterio hasta hace poco. Cameron Currie, Jon Clardy y sus colaboradores, de la Universidad de Wisconsin en Madison y la facultad de medicina de Harvard, han demostrado que el escarabajo

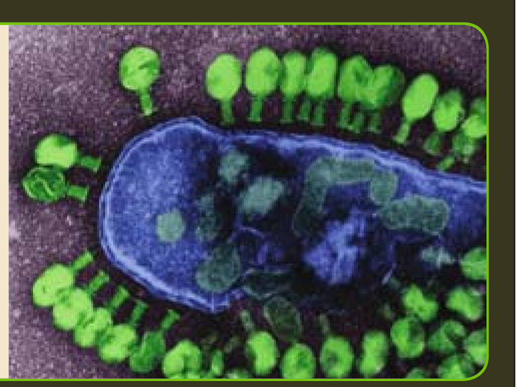
## NUEVOS ENFOQUES

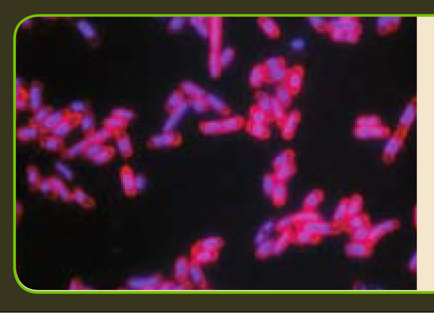
**Además de perfeccionar los antibióticos existentes y de buscar nuevas moléculas con efectos antibióticos, se están estudiando métodos novedosos para matar o inutilizar bacterias patógenas. Muchos de éstos poseen la ventaja adicional de evitar mecanismos que suelen crear resistencia.**




**ABRIR POROS**
En lugar de atacar las enzimas bacterianas o sus procesos vitales, los túbulos que abren poros las matarían por perforación de la membrana celular. Unas diminutas proteínas naturales, las defensinas, llevan a cabo una función similar en los vertebrados para defenderlos de los microorganismos. Varios grupos de investigación están desarrollando péptidos (fragmentos de proteína) sintéticos que se organizarían por sí mismos, formando túbulos insertados en las membranas bacterianas.

**PUNTERIA FINA**
Los bacteriófagos (*verde*) son virus que infectan a bacterias (*azul*); suelen mostrar preferencia por un solo tipo de hospedador. Los fagos vienen estudiándose desde hace mucho por su posible utilización contra bacterias patógenas; además, ilustran el principio subyacente a los nuevos fármacos de "espectro estrecho", que se dirigen sólo contra un patógeno, sin lesionar a las células humanas ni a las bacterias "amistosas".





**SOMETER SIN MUERTE**
Una forma de usar antibióticos sin crear resistencias consistiría en dejar al microorganismo con vida, si bien privado de capacidad patógena. Hallamos un ejemplo en una *E. coli* (*rojo*) modificada por ingeniería genética, diseñada para imitar a las células que moran en el intestino humano. Al ingerir *E. coli* inocuas, éstas embeben Shiga, una toxina mortal producida por otro microorganismo.

LEE D. SIMON *Photo Researchers, Inc.* (*bacteriófago*); FUENTE: "DESIGNER PROBIOTICS FOR PREVENTION OF ENTERIC INFECTION," POR ADRIENNE W. PATON, RENATO MORONA Y JAMES C. PATON, EN *NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY*, 2006, REÍMPRESO CON PERMISO DE MACMILLAN PUBLISHERS LTD (*E. coli* modificada); TAMI TOLPA (*tubos peptídicos*)

cobija a un segundo microorganismo mutualista (un actinomicete) que produce un potente agente antifúngico desconocido. Esa molécula, la micangimicina, mata al hongo antagonista y respeta al mutualista.

Jörn Piel, de la Universidad de Bonn, ha demostrado que otro tipo de escarabajo y una esponja marina alojan simbiontes bacterianos que producen moléculas relacionadas, ambas de tipo antibiótico. También en Alemania, Christian Hertweck, del Instituto Hans Knöll de Jena, ha descubierto un hongo portador de su propio simbionte bacteriano, que produce rizoxina, compuesto de tipo antibiótico. De hecho, la podofilotoxina y la camptotecina, dos fármacos anticancerosos que durante largo tiempo se creyeron producidos por plantas, proceden de hongos que viven en esas plantas. Aunque la exploración de los microorganismos simbiontes apenas si ha empezado, se cuentan ya entre las fuentes de antibióticos naturales más prometedoras; es posible que incluyan compuestos que definan nuevas clases de antibióticos o que posean mecanismos de acción novedosos. Asimismo, la exploración de la función de los microorganismos simbiontes que medran en nuestro cuerpo está abriendo nuevas vías de tratamiento antibiótico.



## Preservar a los aliados

Lo mismo que los insectos y las esponjas, los humanos damos cobijo a una rica variedad de simbiontes bacterianos responsables de múltiples funciones: entre otras, facilitar la digestión de los alimentos y el desarrollo de nuestro sistema inmunitario. Desdichadamente, los antibióticos actuales son instrumentos demasiado contundentes: no atacan sólo a las bacterias patógenas, sino también a las mutualistas beneficiosas que se hallan instaladas en nuestros intestinos. En ocasiones, la erradicación de la microflora intestinal del enfermo despeja el paso a bacterias dañinas, como *Clostridium difficile*, que, al multiplicarse, provocan una nueva infección "secundaria", a veces más peligrosa que la primera.

Para evitar infecciones bacterianas se recurre a sustancias o microorganismos "amigos" que alienten el desarrollo de los mutualistas y así compitan con éxito contra los patógenos. Aunque tales tratamientos "probióticos" pueden resultar útiles para obviar el uso generalizado de antibióticos que promueve la resistencia, no se ha demostrado que resulten eficaces en el tratamiento de infecciones ya existentes.

A pesar de ello, se acepta cada vez más que la microflora intestinal contribuye a mantener a raya a las infecciones. De ahí el interés de una nueva estrategia para el descubrimiento de compuestos antibacterianos: desarrollar fármacos de espectro estrecho, diseñados para atacar a los patógenos responsables de la infección, dejando intactos al resto de nuestras bacterias mutualistas.

En esa línea, Neil Stokes y sus colegas de Prolysis, una compañía con sede en Oxford, han desarrollado en fecha reciente lo que podría ser un nuevo antibiótico, que ataca a *S. aureus* y afines (impide su división celular) y deja intactas a las demás bacterias. Victor Nizet y Andrew Wang, ambos de la Universidad de California en San Diego, junto con Eric Oldfield, de la Universidad de Illinois, han llevado esta idea un paso más allá. Han descubierto un compuesto que bloquea la síntesis de una molécula pigmentaria que contribuye a la virulencia de *S. aureus*, inhibiendo así la función patógena de *S. aureus* sin necesidad de matar a la bacteria.

Los métodos experimentales de inhibición de la virulencia bacteriana aportan el posible beneficio adicional de eludir los mecanismos que generan resistencia. Si un fármaco no mata al patógeno, deja de haber "supervivientes" que puedan resultar favorecidos por la selección natural, por lo que será menos probable la evolución de cepas resistentes. De forma análoga, la metodología de espectro estrecho se funda en el hallazgo de dianas exclusivas o esenciales en la bacteria patógena, que no se encuentren en otras. Así pues, incluso si el microorganismo diana acaba desarrollando resistencia al fármaco, se tratará, en el peor caso, de una resistencia que es improbable que se difunda y resulte útil a otros patógenos.

Está por ver, no obstante, si tales terapias, solas o combinadas con otros tratamientos, resultan viables. Para empezar, los fármacos exigirían pruebas diagnósticas rápidas que identificaran al patógeno responsable de la infección del enfermo. Las pruebas en cuestión, aunque pergeñadas, no son todavía de aplicación generalizada. Los antibióticos de espectro estrecho, cuyas aplicaciones son, precisamente por eso, limitadas, podrían resultar poco atractivos para los laboratorios farmacéuticos.

Pero la idea del antibiótico universal, apto para todas las enfermedades, no es factible. Hace unos cuarenta años existía la creencia de que las enfermedades infecciosas estaban a punto de ser doblegadas. En fecha más reciente, en artículos de la prensa popular se ha proclamado que las bacterias polirresistentes a fármacos han traído consigo el "fin de los antibióticos". Ni una ni otra cosa. Quizá no lleguemos nunca a vencer en esa carrera contrarreloj, pero durante el siglo pasado el desarrollo de terapias nuevas nos ha permitido ir un paso por delante de los patógenos. Debemos realizar el máximo esfuerzo para conservar esa ventaja.

## Bibliografía complementaria


ANTIBIOTICS: ACTIONS, ORIGINS, RESISTANCE. Christopher Walsh. ASM Press, 2003.

ANTIBIOTICS AT THE CROSSROADS. Carl Nathan en *Nature*, vol. 431, págs. 899-902. 21 de octubre, 2004.

NEW ANTIBIOTICS FROM BACTERIAL NATURAL PRODUCTS. Jon Clardy, Michael A. Fischbach y Christopher T. Walsh en *Nature Biotechnology*, vol. 24, n.º 12, págs. 1541-1550. Diciembre, 2006.

SUPERBUGS. Jerome Groopman en *New Yorker*; 11 de agosto, 2008.


PETER Y MARIA HOEY

# Agujeros negros supermasivos

**Vivimos en un universo repleto de agujeros negros, algunos provenientes de la muerte de estrellas y otros, con masas millones de veces mayores que la solar, del nacimiento de las galaxias**

**José Luis Gómez Fernández y Wolfgang Steffen**

### CONCEPTOS BASICOS

- Al parecer, todas las galaxias, incluida la nuestra, albergan en su centro un "agujero negro supermasivo": un agujero negro cuya masa equivale a la de miles de millones de estrellas.
- En torno a esos agujeros se forman discos de acrecimiento de materia. Se generan además inmensos chorros de electrones, acelerados casi hasta la velocidad de la luz. La estratificación de las energías que emiten informa acerca de la naturaleza del objeto que se encuentra en el centro y cuya atracción crea esas estructuras.
- Los instrumentos astronómicos se están acercando a la resolución necesaria para observar el horizonte de sucesos de los agujeros negros del centro de las galaxias, la frontera que aísla para siempre del resto del universo a la materia y a la luz que la cruzan.

Podríamos imaginarnos el espacio como una sábana agarrada por los extremos, para que permanezca estirada. Si lanzamos una bola de billar encima, se curvará. Algo análogo, según la teoría de la relatividad general, le hace una estrella al espacio; cuanto mayor sea la masa de la bola, o de la estrella, más pronunciada será la curvatura generada. En un agujero negro la curvatura adquiere una intensidad tal, que el espacio se "rompe": se le hace un "agujero". Este agujero, más propiamente denominado *singularidad*, supone un verdadero desafío: las leyes de la física tal y como las conocemos hoy en día, incluidas las de la relatividad general, carecen allí de validez.

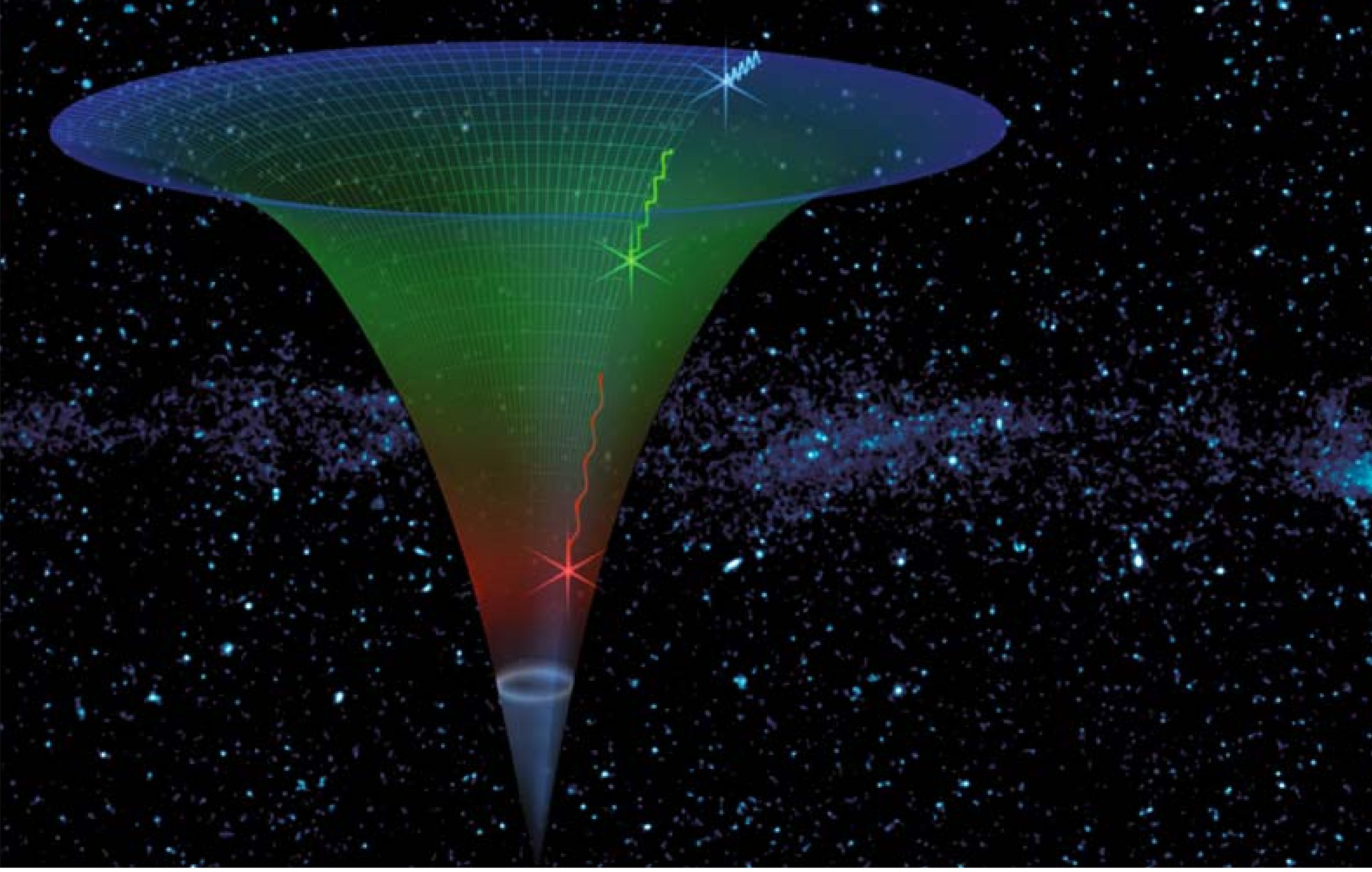
Tan enorme curvatura, o gravedad, afecta también a los rayos de luz. La velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitatoria de un cuerpo es proporcional a su masa: a mayor masa, mayor velocidad. En la vecindad de los agujeros negros, la gravedad es tan alta, que la velocidad de escape se hace mayor que la de la luz: ni siquiera ésta puede escapar. De ahí que sean invisibles, "negros". La distancia de la singularidad a la que la velocidad de escape iguala a la de la luz define una superficie en torno al agujero negro, el *horizonte de sucesos*. El sistema formado por la singularidad y el horizonte de sucesos se denomina agujero negro.

Dado que nada puede viajar más deprisa que la luz, todo lo que se encuentre entre la singularidad y el horizonte de sucesos quedará atrapado en la gravedad del agujero negro. Nuestro universo se encuentra, por tanto, aislado del interior de un agujero negro.

Si aceptamos que, según la conjetura de la censura cósmica de Roger Penrose, toda singularidad debe tener un horizonte de sucesos, o dicho de otra manera, no hay singularidades "desnudas", el precio por cruzar el horizonte de sucesos y observar de cerca la singularidad de un agujero negro será dejar por siempre nuestro universo. Nada impide que lleguemos hasta ella, pero nunca podremos volver y contar qué hemos visto.

## Formación

Si una estrella llega a las últimas etapas de su vida con una masa superior a unas 2 o 3 veces la de nuestro Sol, nada parará su implosión cuando se le agote el combustible nuclear. Se contraerá más y más y la gravedad llegará a ser tan intensa que el espacio se curvará sobre sí mismo hasta generar la singularidad: se habrá formado un agujero negro y la luz de la estrella desaparecerá por siempre de nuestro universo.



NASA/CXC/CfA/R. KRAFT ET AL. (*Centaurus A*); NASA/JPL-CALTECH (*fondo de estrellas*); WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ (*curvatura espacio-tiempo*)

**1. CURVATURA DEL ESPACIO-TIEMPO producida por un agujero negro. Los fotones que ve un observador lejano gastan energía (aumentan su longitud de onda y "enrojecen") al salir del pozo de potencial. De más allá del horizonte de sucesos, ni siquiera la luz consigue escapar.**

Si la primera mitad del siglo XX reveló la posible existencia de agujeros negros de tamaño estelar, la segunda mitad nos sorprendió más aún con la posibilidad de los agujeros negros supermasivos (ANSM), cuyas masas superaban la solar miles de millones de veces. Parecen ser los generadores de las mayores emisiones de energía conocidas en el universo: las de los cuásares o, más en general, las de las galaxias activas, conocidas también por su acrónimo en inglés, AGN.

Recientes observaciones han mostrado que no sólo los AGN parecen contener un ANSM en su interior, sino que pueden estar presentes en todas las galaxias, incluida la nuestra. Sin embargo, aún desconocemos en gran medida cómo estos agujeros negros supermasivos se han formado en el corazón de las galaxias. Mientras algunas teorías apuntan hacia la posible formación de un ANSM como precursor de la galaxia, otras sugieren que el agujero y la galaxia comparten un origen y evolución común; el agujero negro supermasivo acumularía masa a medida que la galaxia creciese.

Esta última hipótesis se ha visto recientemente reforzada gracias a la correlación observada entre las propiedades a gran escala de las galaxias elípticas y las de los bulbos de las espirales con la masa de los agujeros negros centrales que contienen. La masa total de estrellas y su dispersión de velocidades son directamente proporcionales a la masa del agujero negro central.

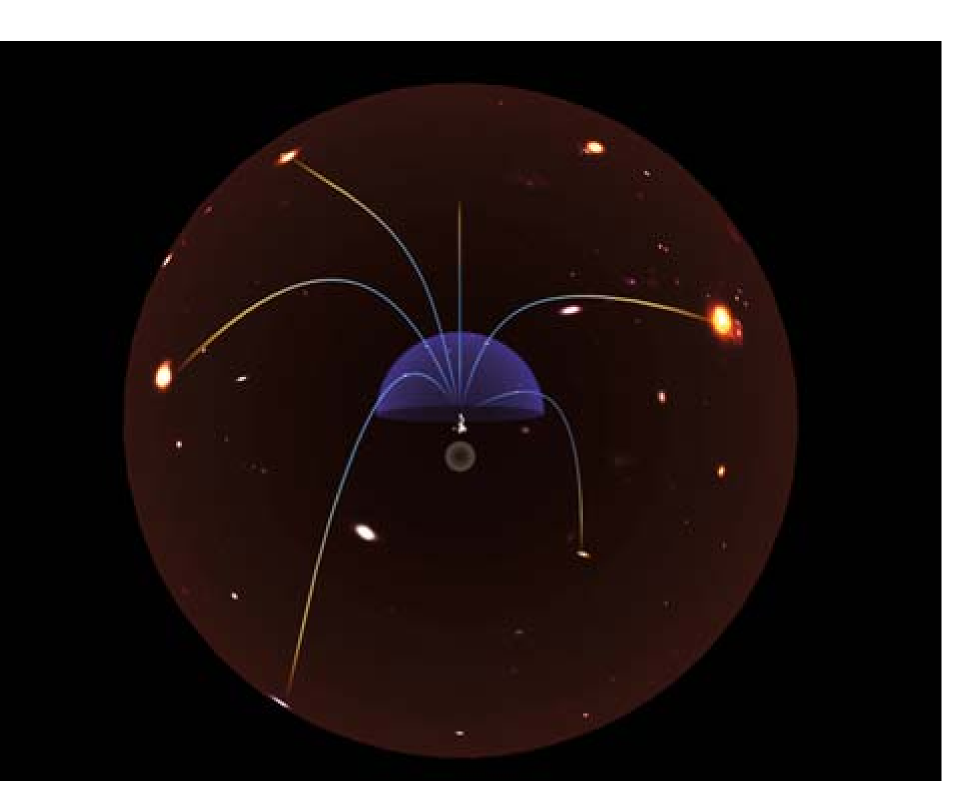
## Viaje a un agujero negro

Una de las primeras pruebas de la presencia de un agujero negro con las que nos encontraríamos al acercarnos a uno de ellos sería la sombra negra que proyecta la región encerrada dentro de su horizonte de sucesos. El tamaño de esa región, proporcional a la masa del agujero negro, mide sólo unos tres kilómetros para un agujero negro de masa solar; la masa propiamente dicha quedaría confinada en una región de unos $10^{-33}$ cm.

La enorme curvatura producida por el agujero negro en la cercanía del horizonte de sucesos actúa a modo de lente, que hace que la sombra del agujero presente un borde brillante en el que se concentra la luz de las estrellas y galaxias situadas *detrás* del agujero negro. Al acercarnos al horizonte de sucesos, comenzaríamos a percibir unas fuerzas de marea, tanto mayores cuanto menor fuese el agujero negro y más cerca nos encontrásemos. Las fuerzas aludidas son el resultado de la rápida variación de la gravedad con la distancia al horizonte de sucesos; distintas partes de nuestro cuerpo experimentarían fuerzas gravitatorias de diferente intensidad.

Las ecuaciones de Einstein muestran que la gravedad no sólo afecta al espacio, curván-

El universo tal y como lo conocemos dejaría de estar a nuestro alcance; nos embarcaríamos en un viaje hacia lo desconocido en la vecindad de la singularidad, donde las leyes de la mecánica cuántica y la gravedad de Einstein se unen de una manera que desconocemos al día de hoy.



**2. EN LAS CERCANIAS DE UN AGUJERO NEGRO la luz del resto del universo se concentra en una ventana, tanto menor cuento más nos acerquemos al horizonte de sucesos.**

WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ

dolo, sino que modifica también el tiempo. El espacio y el tiempo dejan de ser conceptos absolutos e independientes. El fluir del tiempo y del espacio es relativo y depende del observador; no podemos entender uno sin el otro: están integrados en el espaciotiempo. La gravedad de un agujero negro produce una curvatura en el espaciotiempo, por lo que, al acercarnos al horizonte de sucesos, el tiempo fluiría más lentamente para nosotros que para un observador lejano. Por eso, la frecuencia de los fotones que, emitidos por nosotros, captaría el observador distante se reduciría a medida que nos acercásemos al horizonte. Al disminuir su frecuencia, la luz se volvería más y más rojiza; por ese motivo, al fenómeno en cuestión se le denomina corrimiento hacia el rojo gravitatorio.

La dilatación del tiempo iría creciendo a medida que nos acercásemos al horizonte de sucesos, de suerte que, para un observador lejano, vendría a ser como si el tiempo de nuestros relojes se parase justo en el momento en que cruzásemos el horizonte. Le parecería que nunca llegaríamos a cruzarlo; nuestra imagen se le quedaría congelada para siempre en el momento de cruzar el horizonte.

En cuanto a nosotros, este viaje al agujero negro haría que el universo entorno se concentrase en una pequeña ventana circular. Sería como mirar a través del "embudo" producido por la curvatura en el espaciotiempo. A medida que nos acercásemos al agujero negro, la ventana decrecería, para desaparecer en el momento de cruzar el horizonte de sucesos.

## Los indicios

El principal problema a la hora de encontrar pruebas de la existencia de los agujeros negros es que, como hemos visto, no emiten ningún tipo de radiación; al menos, no en cantidad apreciable. La única radiación que pueden emitir es la propuesta por Stephen Hawking y que estaría originada por las fluctuaciones cuánticas del vacío. Esta es inversamente proporcional al tamaño del horizonte de sucesos del agujero negro por lo que sólo los *agujeros negros primordiales*, del tamaño de un núcleo atómico y formados presumiblemente en el origen del universo, emitirían una cantidad de energía reseñable. Tales agujeros diminutos, si llegaron a formarse, lo hicieron en un número muy pequeño; resultaría imposible encontrarnos uno de ellos. Cabría incluso que no obedecieran el principio de censura cósmica de Penrose y muestren su singularidad desnuda. El resto de los agujeros negros tienen una radiación de Hawking indetectable.

Ya que no podemos ver los agujeros negros, para detectar su presencia hemos de recurrir a las perturbaciones que introducen en su entorno. A la manera en que las pisadas en la nieve nos llevan a una persona, las huellas de los agujeros negros se dejan en su enorme gravedad.

Uno de los primeros indicios de la existencia de agujeros negros se obtuvo del estudio de los sistemas binarios de rayos X, formados por una estrella y un agujero negro de tamaño estelar. Ahora los mejores indicios de la existencia de agujeros negros han aparecido en el centro de las galaxias, incluida la nuestra. En estos casos, la huella gravitatoria corresponde a objetos del tamaño de cientos o miles de millones de estrellas.

El centro de nuestra galaxia parece albergar uno de estos ANSM. Gracias a su relativa proximidad (a tan sólo 27.000 ± 1100 años-luz), se ha podido determinar, con una extraordinaria precisión (0,3 milésimas de segundo de arco, equivalentes a 0,00003 años-luz), el movimiento de las estrellas en torno a ese objeto central, que debe contener una masa total de 4,31 ± 0,36 millones de veces la de nuestro Sol. Además, la masa en cuestión ha de estar confinada en un espacio muy reducido, con una densidad de masa equivalente a la de 40 mil billones de estrellas de tipo solar, en un

tamaño algo menor que la distancia que nos separa de la estrella más cercana. Estas son las razones de que se crea que el objeto situado en el centro de nuestra galaxia constituya el que aporta más claros indicios de ser un gigantesco agujero negro.

Otro de los más firmes candidatos a ANSM es el situado en el centro de la galaxia NGC4258. Observaciones del movimiento de nubes de alta velocidad en torno al objeto central han permitido estimar que contiene una masa de 39 ± 3 millones de veces la del Sol. Es pequeña comparada con la obtenida para el centro de la galaxia denominada M87, situada en el centro del cúmulo de galaxias de Virgo: tres mil millones de veces la masa solar.

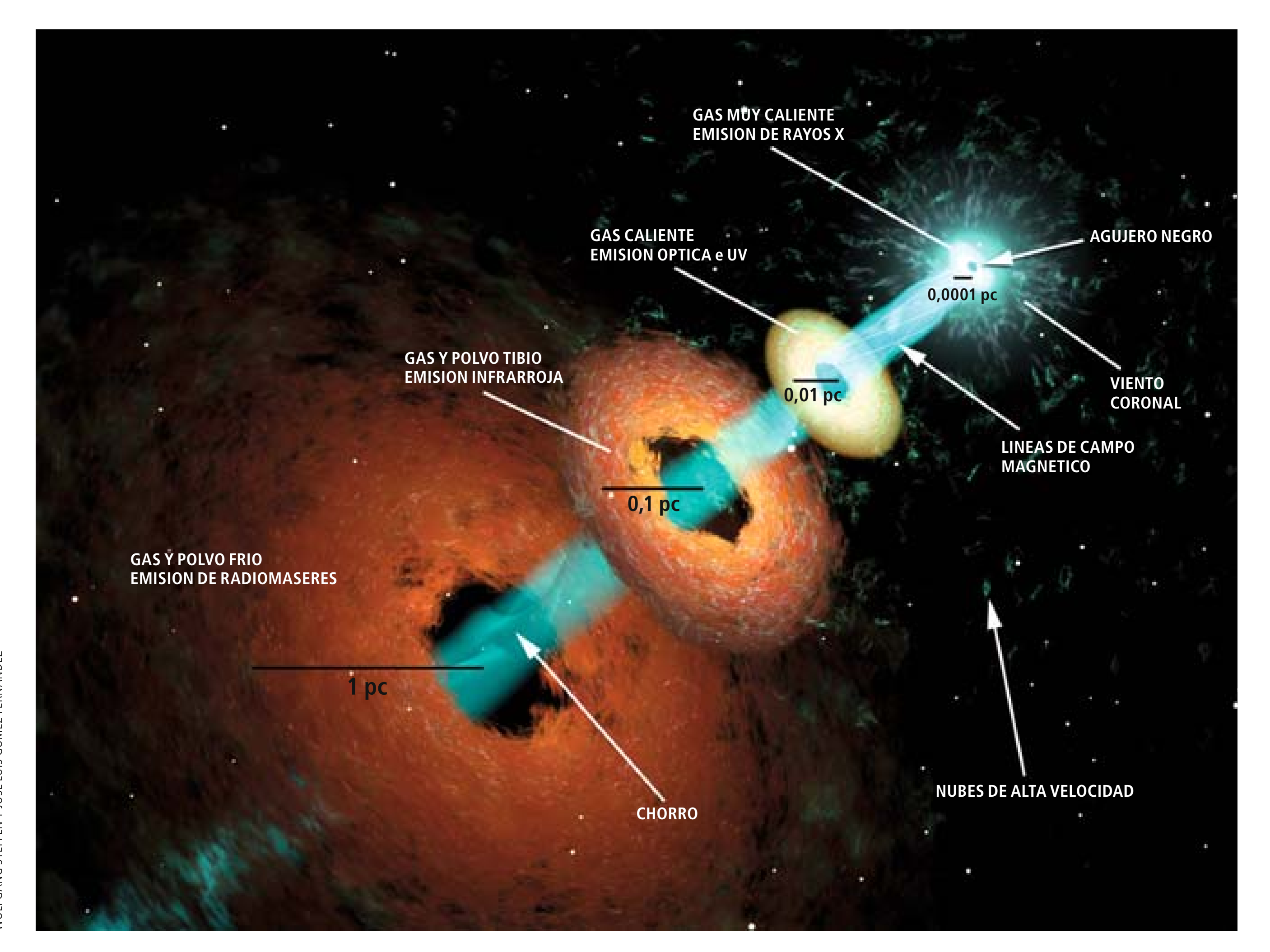
## Agujeros negros supermasivos en el corazón de las galaxias

La presencia de un agujero negro supermasivo produce enormes alteraciones en las regiones internas de la galaxia que lo alberga. Su gran masa da lugar a la formación de inmensos discos de gas y polvo que giran a su alrededor.

En la figura 3 se muestra una imagen esquemática de la región más interna de un AGN. En ella se distinguen las zonas del disco de acrecimiento, según la región del espectro electromagnético en que se emita la mayor cantidad de radiación. Las “nubes”, condensaciones de material interestelar, giran también alrededor del agujero negro a velocidades del orden de miles de kilómetros por segundo.

Debido a su mayor proximidad con respecto al agujero negro central, las regiones más internas del disco giran con una mayor velocidad, creándose una rotación diferencial en el disco en función de su distancia al centro. Se produce así una fricción y, por tanto, calentamiento, que se disipa en forma de emisión a lo largo del espectro electromagnético. Cuanto más cerca nos encontremos del agujero negro, más altas serán las temperaturas del disco y, por consiguiente, más energética la radiación emitida.

El disco de acrecimiento empieza a tomar forma a unos pocos parsecs (1 pc es equivalente a 3,26 años-luz), donde nos encontramos una mezcla de gas y polvo a muy baja temperatura, detectable sólo por su radiación




WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ

**3. ESQUEMA DE UN NUCLEO ACTIVO DE GALAXIAS.** **El agujero negro central da lugar a un disco de acrecimiento que exhibe una estratificación en temperaturas. El material extraído del disco engendra chorros que transportan partículas atómicas a energías y velocidades relativistas. Para mayor simplicidad, se muestran distintas secciones del disco separadas a lo largo del chorro.**

en líneas moleculares correspondientes a longitudes de onda de radio. La observación de estas líneas nos faculta para medir la velocidad del material en el disco con una gran precisión a través del efecto Doppler.

Adentrándonos más en el disco, hasta distancias de décimas de parsec del agujero negro, nos encontramos con una región de gas y polvo tibio que emite sobre todo en el infrarrojo. A unas centésimas de parsec, el disco está lo bastante caliente como para que se evaporen los minúsculos granos de polvo; emite sobre todo en el óptico y el ultravioleta. Se trata de una región que, si bien del tamaño de nuestro sistema solar, emite una cantidad de energía cien veces mayor que todas las estrellas de la galaxia.

Adentrándonos más aún en el disco llegamos a una zona donde el gas alcanza temperaturas de millones de grados; emite rayos X. Más cerca del agujero negro no existen órbitas estables, por lo que el material atraviesa el horizonte de sucesos y desaparece atrapado por el agujero negro.

Pero no todo el material del disco acaba alimentando al agujero negro. Parte es arrancado del disco por los campos magnéticos que se encuentran anclados en el interior de éste, desencadenando uno de los fenómenos más llamativos de la naturaleza: unos gigantescos chorros de partículas que se extienden a velocidades cercanas a la de la luz hasta distancias mucho mayores que la propia galaxia que los alberga. Esos chorros constituyen una de las características más espectaculares de los cuásares y una de las mejores fuentes para su estudio.

La primera observación de un chorro aconteció en 1917. La realizó Heber D. Curtis en M87. A pesar de esta primera detección en el óptico, fueron necesarios otros 60 años para que se desarrollara la radioastronomía y con ella un mejor conocimiento de la naturaleza de los chorros y su relación con los AGN.

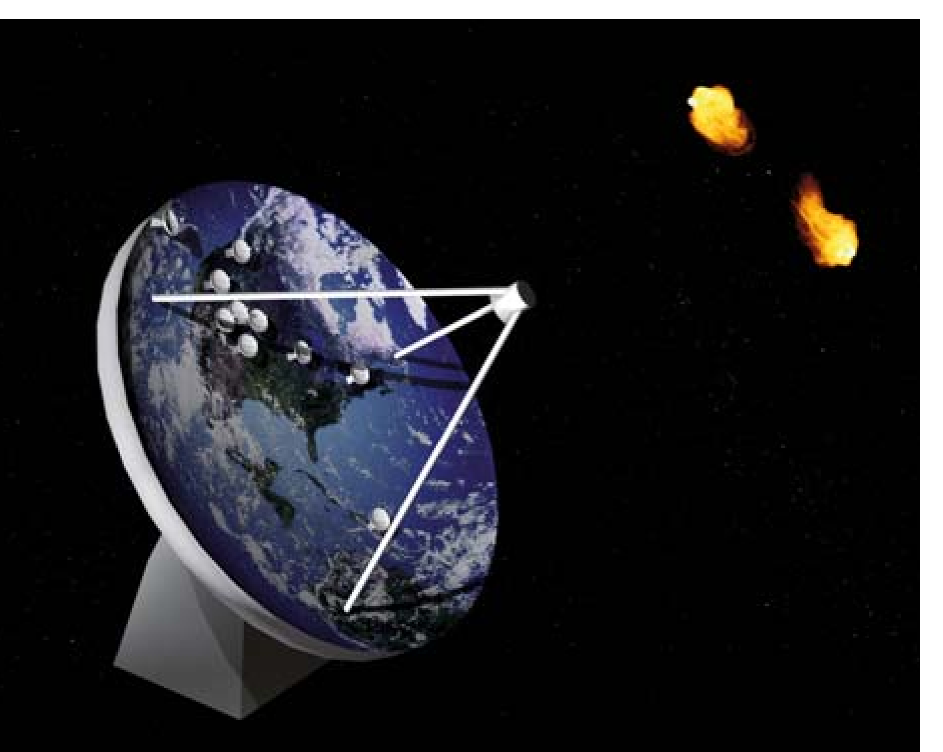
## Radiointerferometría

La mayor parte de la radiación emitida por los chorros de los AGN se concentra en las longitudes de onda milimétricas y centimétricas, es decir, en el rango de las emisiones de radio. Semejante acotamiento supuso inicialmente un inconveniente, dada la pobre resolución de los radiotelescopios comparada con la de los telescopios que observan las longitudes de onda del visible.

El poder resolutivo de un instrumento que trabaja en el límite de difracción viene dado, aproximadamente, por la razón entre la longitud de onda de la observación y la apertura del instrumento. Así, para obtener imágenes con una resolución angular de 1 segundo de arco en el óptico (alrededor de los 550 nm) necesitaríamos un telescopio de unos 14 cm, mientras que a longitudes de onda de radio (alrededor de 1 cm) tendría que ser de unos 2,5 km de diámetro. Esto hizo pensar que la radioastronomía estaría siempre relegada a un papel secundario frente a la astronomía óptica.

La solución del problema provino del desarrollo de una técnica de observación, la *interferometría*. Por esta idea de brillante simplicidad obtuvo Martin Ryle el premio Nobel de física en 1974. No podemos construir una antena de varios kilómetros de diámetro, pero sí múltiples antenas y combinarlas, conjugar sus señales como si fuesen secciones distintas de una mucho mayor, tan grande como la máxima separación entre ellas. Mediante semejante proceder se consigue una resolución igual a la que se obtendría con esa antena equivalente, aunque no la misma sensibilidad. Para que la sensibilidad fuese igual, sería necesario que las antenas del sistema interferométrico cubriesen entre todas el área de la antena equivalente; en la práctica resultaría tan difícil y costoso como construir una única antena.

Martin Ryle se percató entonces de la posibilidad de registrar la señal recibida en cada antena durante un largo período de tiempo; de ese modo, la propia rotación de la Tierra propicia que las antenas (o elementos del interferómetro) cubran una mayor superficie de la antena equivalente. Dicho técnicamente: así se obtiene un mejor cubrimiento del denominado



**4. LAS OBSERVACIONES INTERFEROMETRICAS permiten combinar la señal de distintos radiotelescopios como si se tratase de una sola antena, tan grande como la propia Tierra.**

WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ (*composición*); NRAO/AUI (*Cygnus A*)

plano *u-v*, que no es más que la representación de la superficie de la antena equivalente.

Las señales de las distintas antenas se combinan como en el interferómetro de Michelson. La señal que se recibe en cada antena se procesa en el correlador, dispositivo que compensa el retraso en la llegada de la señal a cada una de las antenas, para lo cual requiere de un modelo complejo de todas las variables que pueden influir; por ejemplo, la propia rotación terrestre. El correlador construye el patrón de interferencias, o función de visibilidad (amplitud y fase), para cada par de antenas (para cada “línea de base”). Esta técnica es conocida como interferometría de muy larga base (VLBI, por su acrónimo en inglés).

Uno de estos interferómetros es el VLBA, consistente en 10 radiotelescopios de 25 metros cada uno repartidos por Estados Unidos, desde Hawai hasta las islas Vírgenes. Con este instrumento es posible sintetizar una antena equivalente tan grande como la propia Tierra; así se obtienen imágenes a longitudes de onda de radio con una resolución angular del orden de 0,15 milisegundos de arco. Tamaña capacidad de observación no tiene comparación en otras ramas de la astronomía; es, por ejemplo, unas 500 veces superior a la obtenida con el telescopio espacial Hubble en longitudes de onda del visible.

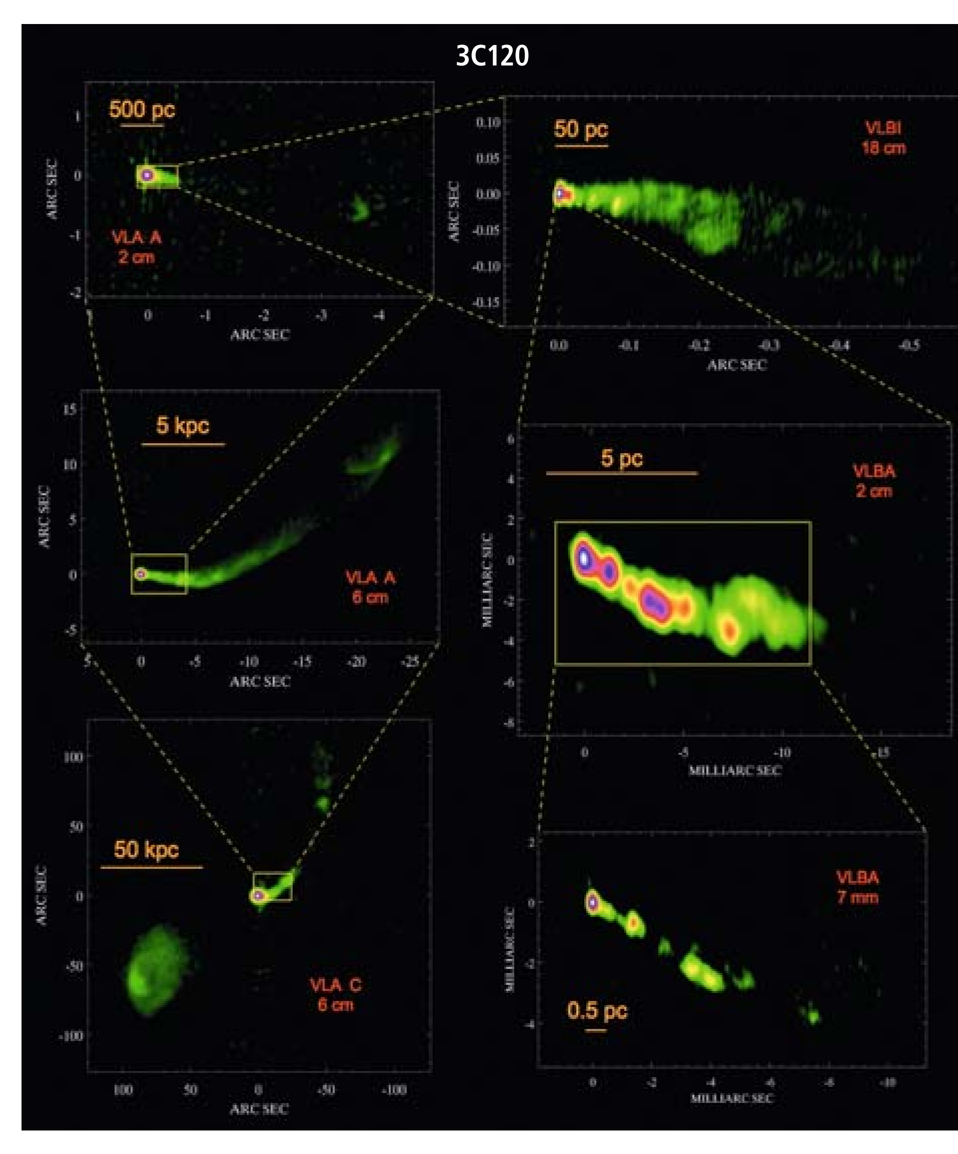
## La radiogalaxia 3C120

Uno de los objetos más interesantes para profundizar en el conocimiento de los chorros en AGN y su relación con los ANSM que albergan es la radiogalaxia 3C120. Esta galaxia se caracteriza por emitir una enorme cantidad de radiación a lo largo del espectro electromagnético, desde longitudes de onda de radio hasta rayos X, con luminosidades que superan los $10^{43}$ erg $s^{-1}$ (unos dos mil quinientos millones de veces mayores que la de nuestro Sol). Se debe semejante cantidad de energía a la acreción de material galáctico en torno a un agujero negro central que tiene una masa unos 30 millones de veces la solar.

Las primeras observaciones de interferometría a longitudes de onda de radio, llevadas a cabo en los años ochenta, revelaron que 3C120 presenta un chorro que se extiende hasta distancias del orden de 100 Kpc, muy superiores al tamaño en el óptico de la propia galaxia que lo contiene. Este chorro, al que podemos considerar representativo de los que hay en los AGN y en los sistemas binarios —de estrella y un objeto muy compacto, quizás un agujero negro— a los que se llama microcuásares, transporta materia y energía desde las regiones más centrales de la galaxia hasta el medio intergaláctico. A lo largo de esas distancias enormes, los chorros se mantienen muy colimados, con ángulos de apertura que en la mayoría de los casos es inferior a un grado.

Gracias al análisis del espectro de emisión, es decir, de cómo varía ésta en función del rango de energía considerado, podemos descubrir el mecanismo por el que los chorros emiten grandes cantidades de energía en longitudes de onda de radio. La mayoría suele mostrar un espectro bastante plano: emiten una cantidad de energía muy similar, independientemente de la longitud de onda de radio a la que observemos. Esta distribución difiere de la esperada para un cuerpo negro, un objeto con una emisión característica determinada por la temperatura a la que se encuentre; es, por ejemplo, el caso de una estrella. De ahí que se diga que la emisión de los chorros es de naturaleza no térmica.

Sin embargo, el espectro se ajusta bien al esperado para una radiación de tipo sincrotrón, la radiación que emiten las partículas cargadas muy energéticas cuando se hallan



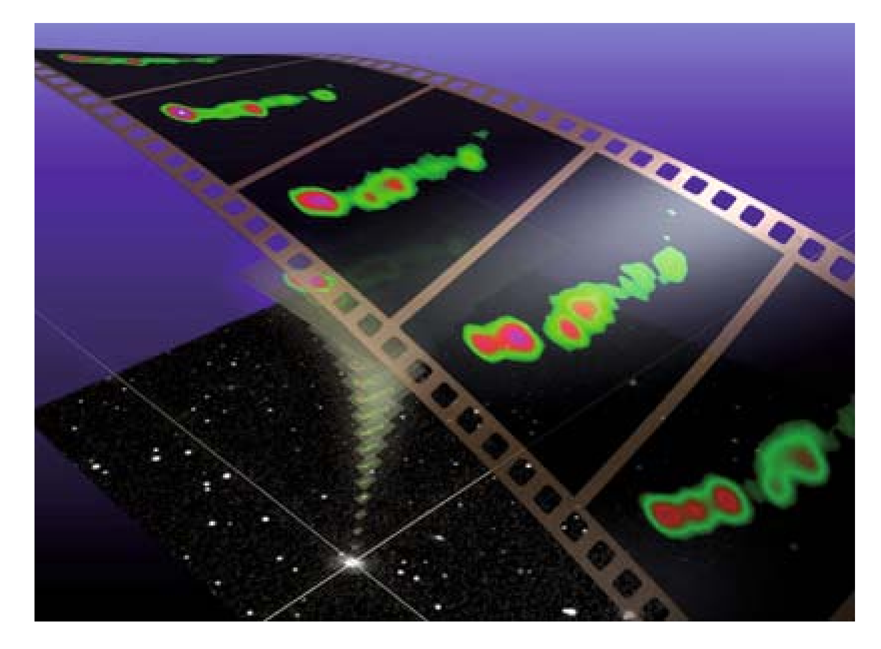

**5. IMAGENES DEL CHORRO RELATIVISTA de la radiogalaxia 3C120 a diferentes escalas angulares.**

WOLFGANG STEFFEN, JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ Y CRAIG WALKER (NRAO/AUI)

inmersas en un campo magnético. La cantidad de energía emitida es inversamente proporcional a la masa de la partícula elevada a la cuarta potencia. Por tanto, la mayor parte de la radiación sincrotrón que proviene de los chorros tiene que haber sido producida por electrones de muy altas energías que viajan a lo largo de los chorros, que a su vez contienen un campo magnético.

Una de las características de la radiación sincrotrón estriba en lo siguiente: la energía liberada por el electrón, así como la frecuencia a la que la emite en su mayor parte, es proporcional a su energía inicial. Se configura así una estratificación en el chorro, tanto en la cantidad de energía como en la frecuencia a la que es emitida. Las regiones más internas desprenden una gran cantidad de energía, y lo hacen fundamentalmente mediante fotones de energías muy altas, correspondientes a longitudes de onda del óptico, o incluso en rayos X. A medida que los electrones viajan a lo largo del chorro y van perdiendo energía, radian cada vez menos energía y lo hacen a longitudes de onda crecientes.

La estructura más interna de los chorros, su "núcleo", presenta por lo general una emisión ópticamente "gruesa". Quiere decir que la mayor parte de la emisión que se genera en esta región es absorbida por la propia fuente. Sólo la emisión generada en las capas más externas puede escapar y llegar hasta nuestros radiotelescopios. De esta manera, al igual que una espesa niebla no nos permite ver qué hay detrás, la fuerte autoabsorción de la emisión en el núcleo nos impide observar sus capas más internas. Por eso, resulta más difícil analizar cuáles son los procesos físicos desarrollados en esa región, que presenta un interés especial, pues ahí se generan los chorros. A medida que vamos recorriendo el chorro, alejándonos del núcleo, vemos que éste suele presentar unas regiones de emisión más intensa; se les da el nombre de *componentes*.



**6. OBSERVACIONES DE RADIOINTERFEROMETRIA permiten estudiar la evolución temporal de la emisión en el chorro de la radiogalaxia 3C120 con una resolución angular hasta 500 veces mejor que la ofrecida por el telescopio espacial Hubble en el rango óptico.**

JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ Y FERMIN GOMEZ FERNANDEZ *(composición)*

## ¿Velocidades mayores que la de la luz?

Gracias a la relativa cercanía de la radiogalaxia 3C120, situada a sólo unos 125 Mpc, las observaciones de interferometría de muy larga base con el VLBA a una longitud de onda de 7 mm nos permiten estudiar el chorro de 3C120 con una resolución espacial de unos 0,07 pc. Para hacernos una idea de la óptima resolución alcanzada: con ella apreciaríamos los detalles de un balón de baloncesto situado en la Luna. Podemos así acercarnos a las regiones más internas del chorro de 3C120 y estudiar su evolución en el transcurso del tiempo. Gracias a este tipo de observaciones, uno de los autores (Gómez) y sus colaboradores han realizado un seguimiento mensual durante casi dos años del chorro de 3C120. De ese empeño salió uno de los estudios más detallados hasta la fecha sobre dichos objetos.

Las regiones de emisión más intensa, o "componentes", del chorro muestran un comportamiento característico de estas fuentes, pero no por ello menos intrigante: su movimiento proyectado en el plano del cielo es mucho más rápido que la luz. La primera vez que se observó el *movimiento superlumínico,* en los años setenta, se pensó que violaba la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, es perfectamente explicable dentro de la teoría de la relatividad, y nos ha permitido constatar un hecho de suma importancia en el estudio de los chorros en AGN: el material que viaja a lo largo de los chorros ha de hacerlo a una velocidad que, si bien no es superior a la velocidad de la luz, ha de hallarse muy cercana a la misma (del orden del 90 % o superior); además, ha de viajar en una dirección cercana a la de la visual.

## Los ANSM y su entorno

El estudio detallado de la evolución de la estructura del chorro en la radiogalaxia 3C120 ha puesto de manifiesto la importancia de su interacción con el medio a través del cual se propaga. Como ya hemos dicho, se trata de un medio poco homogéneo, con regiones de mayor densidad, o nubes, que orbitan en torno al agujero negro central supermasivo. El ingente pozo de potencial del agujero negro hace que las nubes más internas presenten elevadas velocidades de rotación; se crean así nubes de alta velocidad, responsables de líneas de emisión con amplias anchuras re-

## MOVIMIENTO SUPERLUMINICO

Cuando medimos, en los chorros relativistas, movimientos proyectados en el plano de observación, sus velocidades pueden superar la velocidad de la luz. Se habla entonces de movimientos superlumínicos, sin que por ello se viole una de las premisas fundamentales de la teoría de la relatividad: nada puede viajar más rápido que la luz.

Consideremos una región de emisión (una "componente") que viaja a lo largo del chorro con una velocidad v (cercana a la de la luz) y formando un ángulo pequeño $\theta$ con respecto al observador. Emite dos pulsos de luz separados por un intervalo de tiempo $\Delta t$, como se muestra en la figura. El primer pulso de luz viaja hacia el observador a la velocidad de la luz *c*: recorre durante este intervalo una distancia $c\Delta t$ en su camino hacia el observador. Mientras tanto, la componente se mueve a lo largo del chorro a una velocidad muy cercana a *c*; por eso, cuando emite el segundo pulso de luz $\Delta t$ más tarde, ya ha recorrido una distancia en dirección al observador que viene dada por su proyección en esa dirección, igual a $v\Delta t\cos\theta$. De ese modo, el segundo pulso ha de recorrer una distancia hasta el observador menor que el primero, dada por $c\Delta t - v\Delta t\cos\theta$ (*en azul en la figura*). Esto supone que los pulsos de luz llegarán al observador con una diferencia de tiempos igual a la que necesita la luz para viajar esta distancia, que es igual a $(c\Delta t - v\Delta t\cos\theta)/c$, o lo que es lo mismo $\Delta t(1 - \beta\cos\theta)$, en donde $\beta = v/c$.

Esto nos permite calcular fácilmente la velocidad aparente $v_{ap}$ medida por un observador en el plano del cielo: es igual a la distancia recorrida por la componente proyectada en el plano de observación, igual a $v\Delta t\,\mathrm{sen}\,\theta$, dividida por la diferencia en los tiempos de llegada de los dos pulsos de luz que hemos calculado antes: $\Delta t(1- \beta\cos\theta)$. Por tanto $v_{ap} = (v\,\mathrm{sen}\,\theta)/(1 - \beta\cos\theta)$, o en unidades de la velocidad de la luz (dividiendo por *c*) $\beta_{ap} = (\beta\,\mathrm{sen}\,\theta)/(1 - \beta\cos\theta)$.

Es fácil, por tanto, ver que, dependiendo de la velocidad del material en el chorro y de su orientación relativa con respecto al observador, podemos llegar a medir velocidades proyectadas en el plano del cielo mayores que la de la luz. Por ejemplo, para una componente que se mueva, con un ángulo con respecto al observador de 20°, a una velocidad de $\beta = 0{,}9$ (es decir, el 90 % de la de la luz) mediríamos una velocidad proyectada en el plano de observación de aproximadamente el doble de la velocidad de la luz. Se han llegado a medir en chorros de AGN velocidades superlumínicas de hasta unas 40 veces la de la luz.



lativas. En las partes más alejadas, tenemos nubes de menor velocidad y densidad, con líneas de emisión más estrechas. Aunque se desconoce la distribución de estas nubes, se espera que tengan unas densidades lo suficientemente grandes para que la probabilidad de colisión del chorro con una resulte bastante alta.

El análisis de la evolución de la emisión por parte de algunas componentes del chorro 3C120 muestra indicios de una intensa interacción con una nube de ésas. Contrariamente a lo esperado, la emisión de algunas de estas componentes presenta un aumento brusco cuando se encuentran en una región del chorro situada a unos 8 pc del núcleo. El aumento, que acontece en sólo unos meses, viene acompañado por una reordenación y rotación progresiva del campo magnético.

Para explicar estos cambios necesitamos que una región del chorro, o componente, colisione con una nube. Durante la colisión se produce una onda de choque, que aumenta la energía de los electrones del chorro, así como su densidad. Esta onda de choque debe al mismo tiempo producir una realineación del campo magnético, lo cual explicaría el aumento en la emisión linealmente polarizada. Si el aumento brusco de la emisión es inusual, lo es también su repentina disminución. Para poder explicarla ha de haber una opacidad extra, procedente probablemente de la propia nube.

Podemos hacer una estimación de cuáles son los parámetros esperados para esta nube a partir de las variaciones en la emisión, tanto en flujo total como en el linealmente polarizado. A partir de la medida de la rotación y de la

WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ

opacidad calculada, podemos establecer la columna de densidad necesaria: se obtienen unos valores intermedios entre los que se calculan para las regiones de nubes de líneas anchas y los de las nubes de líneas estrechas. Por tanto, el chorro se hallaría interaccionando con una nube de un tamaño de unos 0,5 pc, con una densidad electrónica de unos $5 \times 10^4$ $cm^{-3}$ y un campo magnético de unos 0,4 microgauss.

## Formación de los chorros

Aún desconocemos en gran medida cómo el sistema constituido por el agujero negro y su disco de acrecimiento propicia la formación en los AGN de un par de chorros que transportan materia y energía en sentidos opuestos a lo largo del eje de rotación del agujero negro. Sin embargo, se trata de un proceso harto común en la naturaleza: no sólo se da en los AGN, sino también en estrellas en formación, púlsares y microcuásares y, probablemente, en las erupciones de rayos gamma, es decir, en los sistemas donde se produce acreción de materia en torno a un objeto masivo central. Parece que estas distintas situaciones astrofísicas comparten una misma regla: la velocidad del material que forma los chorros es cercana a la velocidad de escape del sistema. Puesto que para un agujero negro la velocidad de escape es la velocidad de la luz, los chorros que se observan en los AGN, y en otros sistemas con un agujero negro central, suelen presentar una velocidad cercana a esa velocidad límite de la naturaleza.

Las observaciones de la radiogalaxia 3C120 nos permiten indagar en los procesos que dan lugar a la formación de los chorros. Su espectro de emisión en rayos X se caracteriza por una componente débil (es decir, de energías relativamente bajas) originada en las zonas más internas del disco de acrecimiento, junto con una componente más energética proveniente de una corona de electrones de muy alta energía, que reprocesan la emisión del disco. A ello debemos añadirle una línea de emisión de hierro que sugiere que la emisión del disco de acrecimiento es mucho más intensa que la que se origina en las regiones más internas del chorro.

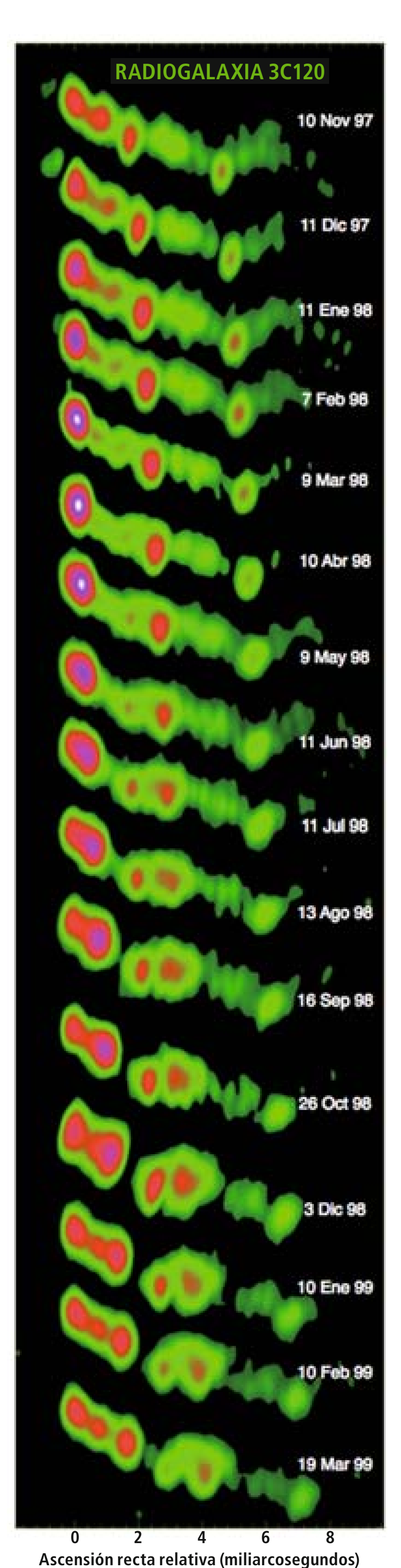
Por tanto, si observamos la radiogalaxia 3C120 en rayos X estaremos observando las zonas internas del disco de acrecimiento, mientras que si lo hacemos en longitudes de onda de radio estaremos captando fundamentalmente la emisión que proviene del chorro. Observaciones simultáneas en ambas regiones del espectro electromagnético deberían, por consiguiente, proporcionarnos información sobre la posible conexión entre el disco y el chorro.

Con este fin, Alan P. Marscher, de la Universidad de Boston, y sus colaboradores (entre los que se encuentra uno de los autores, Gómez) han llevado a cabo una campaña de observaciones de 3C120 en rayos X con el RXTE (satélite Rossi para la observación de rayos X) y, simultáneamente, con los radiotelescopios de la Universidad de Michigan, Metsähovi (en Finlandia) y el radiointerferómetro VLBA. Tras más de tres años de observaciones, se ha podido comprobar que la emisión en rayos X (en el rango entre 2,4 y 20 keV) de 3C120 suele presentar disminuciones en su intensidad, siempre seguidas, alrededor de un mes más tarde, de un aumento de la emisión a longitudes de onda de radio.

Según algunas hipótesis, la bajada en la emisión en rayos X puede deberse a una disminución en la eficiencia con la que el disco emite radiación, relacionada con cambios en la configuración de su campo magnético. Por otro lado, es posible que la bajada en la emisión en rayos X obedezca a una disminución en la cantidad de materia que emite en rayos X en las zonas más internas del disco de acrecimiento. Es decir: una sección más interna del disco "desaparece". La pregunta, por tanto, es: ¿adónde va? Dada su cercanía al horizonte de sucesos del agujero negro central, y puesto que el material que cruza este horizonte deja de ser visible desde nuestro universo, la hipótesis más razonable es que la materia que desaparece lo hace porque la engulle el agujero negro.

De manera sistemática, la bajada en rayos X viene seguida por un aumento en la emisión en radio, que, como sabemos, se origina sobre todo en los chorros. Por lo tanto, no todo el material que desaparece de la zona más interna del disco es engullido por el agujero negro; una parte debe inyectarse en los chorros que observamos en radio. Si la hipótesis esbozada es correcta, las imágenes de interferometría deberían mostrar la aparición de nuevas componentes en el chorro mejor orientado con respecto al observador; y eso es justamente lo que muestran las observaciones realizadas con el VLBA. Nuevas componentes superlumínicas aparecen en el chorro cada vez que baja la emisión en rayos X, y producen el aumento en la emisión en longitudes de onda de radio.

Las componentes presentan una velocidad media del orden de cinco veces la velocidad de la luz. Por tanto, en un mes, entre la disminución de la emisión en rayos X y su aparición en el chorro, viajan una distancia, proyectada en el plano del cielo, de unos 0,15 mili-




**7. SECUENCIA DE IMAGENES del chorro en la galaxia 3C120 obtenidas con el radiointerferómetro VLBA. Estas muestran regiones de emisión con velocidades en el plano del cielo entre 4 y 5 veces mayores que la de la luz.**

JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ Y *SCIENCE*

segundos de arco. De ello se sigue que el agujero negro no se encuentra exactamente donde se origina el chorro, sino que hay una región entre el agujero y el chorro en la que éste es a todos los efectos invisible, y no por opacidad alguna, sino quizá porque el material que lo forma necesita cierta distancia hasta alcanzar una energía lo bastante alta para que la radien procesos de tipo sincrotrón e inverso Compton (en el que los fotones ganan energía a expensas de la materia) y resulte observable por nuestros telescopios.

La correlación observada entre la emisión en rayos X y radio en 3C120 viene a confirmar nuestra suposición de que los chorros que observamos se generan en la acreción de material en torno a un objeto central compacto de enorme masa que debe de poseer un horizonte de sucesos. Ahora bien, la posesión de un horizonte de sucesos distingue a los agujeros negros frente a otros pozos de potencial gravitatorio intenso. Nos encontramos, pues, con una de las pruebas más claras de la existencia de un agujero negro supermasivo en el corazón de una galaxia activa.

Con anterioridad, habían observado un comportamiento muy similar Félix Mirabel, hoy en el Observatorio Europeo del Sur, y Luis F. Rodríguez, de la Universidad Autónoma de México, en el microcuásar GRS1915+105. En este caso, la masa del agujero negro responsable de la actividad del sistema es de "tan sólo" unas 10 veces la del Sol, es decir, unos 3 millones de veces menor que en 3C120. Esta razón entre las masas de los agujeros negros parece determinar el "factor de escala" entre ambos sistemas, algo esperable por otro lado, pues el factor en cuestión debe guardar relación con la razón de tamaños de los correspondientes horizontes de sucesos, que a su vez es directamente proporcional a la masa de los agujeros negros. Los microcuásares que encontramos en nuestra propia galaxia parecen ser una versión a escala reducida de los enormes AGN que encontramos repartidos por el universo. En cierta medida, constituirían una especie de pequeños laboratorios donde se podría estudiar en intervalos de minutos lo que requeriría años de observación en los cuásares.

## Fotografiar un agujero negro

Probablemente, uno de los mayores retos de los próximos años será el de obtener imágenes directas del horizonte de sucesos de un agujero negro. Se trataría, sin duda, de una de las pruebas más claras de la existencia de estos objetos, a la vez que supondría uno de los mejores laboratorios para comprobar las predicciones de la teoría de la relatividad de Einstein.

Como hemos visto, uno de los lugares más prometedores para un estudio así es el propio centro de nuestra galaxia. Imágenes con la mejor resolución angular disponible en la actualidad, del orden de 100 microsegundos de arco, nos acercan al horizonte de sucesos a una distancia igual a unas decenas de veces su tamaño. La imagen directa de la enorme distorsión producida en el espaciotiempo que rodea al agujero negro se encuentra, por tanto, a sólo un orden de magnitud de mejora de la resolución angular alcanzada.

Según lo expuesto, tamaña capacidad de resolución angular es posible gracias a observaciones de interferometría de muy larga base creadas por la combinación de radiotelescopios repartidos por toda la superficie terrestre. El salto extra en resolución angular, hasta alcanzar los 10 microsegundos de arco (o menor), requiere de un aumento en la apertura del interferómetro (de la distancia máxima entre las antenas que lo forman) o de una disminución en la longitud de onda de observación.

La primera de tales opciones alternativas nos llevaría necesariamente a utilizar antenas en órbita terrestre; combinadas con las situadas en la superficie, nos permitirían extender la apertura del interferómetro hasta distancias superiores al tamaño de la Tierra. Nos referimos a una vía explorada ya con éxito por la agencia espacial japonesa, que en 1997 puso la antena de 8 metros de diámetro HALCA en una órbita con un apogeo de 21.400 km. Supone un aumento en un factor de aproximadamente tres en la distancia máxima entre



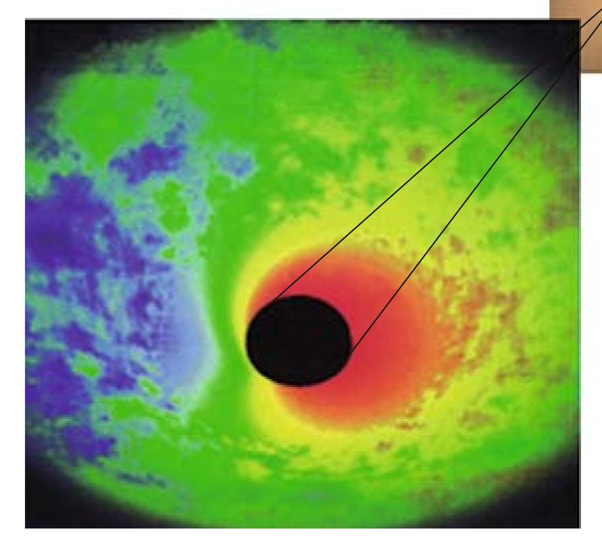
WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GOMEZ FERNANDEZ

**8. LOS CAMPOS MAGNETICOS anclados en el disco de acrecimiento transfieren parte de su energía a los chorros relativistas.**

## Los autores

**José Luis Gómez Fernández** y **Wolfgang Steffen** estudian los chorros relativistas presentes en núcleos de galaxias activas y otros flujos astrofísicos. Gómez es científico titular del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), en Granada, donde realizó su tesis doctoral, tras la que completó su formación en el Instituto de Astrofísica de la Universidad de Boston y el departamento de astronomía de la Universidad de Manchester. Steffen realizó su tesis doctoral en el Instituto de Radioastronomía de la Sociedad Max Planck, en Bonn, y completó su formación en el departamento de astronomía de la Universidad de Manchester, siendo actualmente investigador titular del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, en su sede de Ensenada.

**9. MAXIM, al multiplicar por un millón la resolución del Telescopio Espacial Hubble, ampliaría las imágenes que éste ofrece (*derecha*) del núcleo de la galaxia M87, hasta el punto de que el agujero negro que debe de encontrarse allí, y del que parte el chorro de partículas visible en la imagen del Hubble, se percibiría como en la ilustración inferior.**



las antenas del interferómetro. Sin embargo, este aumento de la separación entre antenas no se ha podido trasladar a un aumento en la resolución angular, pues la mínima longitud de onda a que podía operar HALCA es de 6 cm, muy superior a la longitud en que pueden trabajar las antenas de la superficie terrestre (entre 7 y 3 mm). No obstante, HALCA ha permitido constatar la viabilidad de la idea y de futuras misiones de VLBI con antenas en órbita, como su sucesora, VSOP-2, aún en proyecto, o la misión RadioAstron (de la agencia espacial rusa), con las que se pretende alcanzar resoluciones angulares del orden de 10 microsegundos de arco.

De igual manera se están realizando esfuerzos para mejorar la resolución angular gracias a una disminución de la longitud de onda de observación. Supone un imponente desafío desde el punto de vista técnico, aunque ya se ha avanzado cierto trecho en esa dirección, con observaciones de VLBI a longitudes de onda de 1 mm.

A más largo plazo podría llevarse la técnica de la interferometría hasta el rango energético de los rayos X. El proyecto MAXIM, de la NASA, se propone colocar en órbita un conjunto de 32 telescopios de rayos X con una separación máxima entre sí de 200 m, lo que permitiría alcanzar una resolución angular de 0,1 microsegundos de arco. El interferómetro está ideado para poder observar los rayos X emitidos por las zonas más internas de los discos de acrecimiento en torno a agujeros negros supermasivos justo cuando el material alcanza el horizonte de sucesos y su imagen se queda congelada en el tiempo antes de que lo engulla el agujero negro.

Una vía alternativa a la observación directa de un agujero negro consiste en la detección de las huellas que deja su enorme gravedad. Variaciones bruscas en la gravedad, como las producidas en sistemas binarios de agujeros negros, generan ondulaciones del propio espaciotiempo, similares a las que observamos en un estanque al lanzar una piedra. La detección de estas *ondas gravitatorias* abriría una ventana novedosa a nuestra forma de ver el cosmos. Con este fin, la ESA y la NASA están desarrollando conjuntamente el proyecto LISA (“Antena Espacial de Interferometría por Láser”), cuyo lanzamiento está previsto para 2012. Contará con tres telescopios en órbita solar separados 5 millones de kilómetros. Podrá detectar, por vez primera, las ondas gravitatorias producidas por la formación de agujeros negros, su coalescencia en sistemas binarios e incluso las fluctuaciones gravitatorias generadas en la propia formación del universo.

Los avances realizados en los últimos decenios nos permiten ser optimistas acerca de la posibilidad de resolver cuestiones fundamentales asociadas con la naturaleza de los agujeros negros supermasivos, como su formación y su relación con el entorno galáctico. Sobre esos fundamentos avanzaremos en el conocimiento de la formación de los chorros relativistas y sabremos por qué algunos convierten a su galaxia anfitriona en un AGN, mientras otros parecen estar en una situación de letargo, de baja actividad, como el situado en el centro de nuestra galaxia.

## Bibliografía complementaria


FLASHING SUPERLUMINAL COMPONENTS IN THE JET OF THE RADIO GALAXY 3C120. J. L. Gómez, A. P. Marscher, A. Alberdi, S. G. Jorstad, C. García-Miró en *Science*, vol. 289, pág. 2317; 2000.

OBSERVATIONAL EVIDENCE FOR THE ACCRETION-DISK ORIGIN FOR A RADIO JET IN AN ACTIVE GALAXY. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, J. L. Gómez, M. F. Aller, H. Teräsranta, M. L. Lister, A. M. Stirling en *Nature*, vol. 417, pág. 625; 2002.

http://www.nrao.edu


NASA/HST (*arriba*); BENJAMIN C. BROMLEY (*abajo*)

# El almidón

*La proporción de amilosa y amilopectina, una molécula lineal y la otra ramificada, determina las propiedades de cada tipo de almidón*

Pere Castells

El almidón es un hidrato de carbono complejo (polisacárido) digerible, del grupo de los glucanos. Consta de cadenas de glucosa con estructura lineal (amilosa) o ramificada (amilopectina). Constituye la reserva energética de los vegetales. En la cocina se valora por ser un hidrocoloide: tiene la capacidad de atrapar agua, lo que provoca la formación de geles, o de espesar un líquido o un producto licuado.


**Al hidratarse, el almidón forma estructuras que aumentan la viscosidad.**

La amilosa y la amilopectina son polisacáridos que el organismo puede degradar (digerir), mediante las enzimas amilasa y glucosidasa presentes en la saliva y el jugo pancreático. En 2007, un grupo de investigadores encabezado por George H. Perry, de la Universidad estatal de Arizona en Tempe, y Nathaniel J. Dominy, de la Universidad de California en Santa Cruz, demostraron que los humanos poseen copias adicionales del gen *AMY1* (básico para la síntesis de la amilasa) y mayor proporción de *AMY1* que los demás primates. Existen también diferencias entre poblaciones humanas, según cuál haya sido el consumo de productos ricos en almidón durante generaciones. Los almidones, ricos en calorías, pudieron resultar cruciales para la alimentación y la evolución humana.

El almidón se obtiene mayoritariamente del maíz, trigo, arroz, patata y tapioca. Si proviene de un tubérculo suele denominarse fécula (fécula de patata); si de un cereal, almidón. Las propiedades del almidón varían en función del producto del cual se extrae y de la variedad. Ello se debe a la longitud de las cadenas y, sobre todo, a la proporción de los dos tipos de cadenas que lo forman. La amilosa (lineal) hace predominar la estructura gelificada, ya que forma tramas tridimensionales; la amilopectina (ramificada) produce en los líquidos una mayor viscosidad. El arroz con una proporción elevada de amilopectina resulta viscoso (pegajoso) y, por tanto, muy apropiado para la elaboración de sushi.

El porcentaje de amilosa y amilopectina varía de un almidón a otro: 28 y 72 en almidón extraído del maíz, 16 y 84 en el extraído de la tapioca, 20 y 80 en el de patata. Un caso especial son los almidones céreos: apenas si contienen amilosa y disponen sólo de estructuras ramificadas de amilopectina. Todos estos almidones se denominan "nativos", porque su extracción no modifica la estructura de los componentes.

En condiciones extremas, los almidones nativos sufren retrogradación, que causa una modificación de la estructura. Cuando un almidón se cuece en agua, forma una pasta que, al principio, presenta una superficie lisa y brillante. Pasadas unas horas, comienza a agrietarse la membrana y aparecen gotas de agua libre, proceso atribuible a la amilosa. En efecto, una vez bien hidratada por la cocción y ya en reposo, establece uniones con otras amilosas vecinas, que se acercan sin impedimentos (por su estructura lisa), y una parte del agua es expulsada (sinéresis); no ocurre así con la amilopectina, cuyas ramificaciones impiden el acercamiento. Por ello, al preparar una paella se deja reposar el arroz unos minutos para que suelte una pequeña cantidad de agua y quede más húmedo en superficie. Ciertos arroces favorecen dicho proceso, en el cual centra su trabajo Davide Cassi, de la Universidad de Parma.

Para satisfacer las necesidades de la industria alimentaria, se han desarrollado almidones modificados que operan a modo de espesantes, gelificantes o estabilizantes. Cada tipo de almidón se adapta a los requerimientos de una aplicación concreta, según las características del alimento (ingredientes, *p*H, azúcares, sales) y los procesos de producción y conservación (temperatura, cizalla, presión, ciclos de congelación y descongelación, etcétera). Los almidones modificados se consideran aditivos: almidón oxidado (E-1404), fosfatos de almidón (E-1410, E-1412, E-1413, E-1414), almidones acetilados (E-1420, E-1422), almidón acetilado y oxidado (E-1451) y otros (E-1440, E-1442, E-1450).

Las aplicaciones en la industria alimentaria se distribuyen en sectores muy dispares, que van de la confitería a los productos cárnicos, pasando por conservas, salsas, productos lácteos y bollería. El almidón de maíz (maicena) se utiliza como espesante en la cocina, aunque también pueden encontrarse los de tapioca, patata, trigo y arroz.

La legislación alimentaria no limita el uso del almidón. La dosificación es *quantum satis* (la cantidad que se necesite para conseguir el efecto deseado). El almidón se aplica mediante dispersión en frío (entre el 4 y el 10 por ciento según la viscosidad deseada) e hidratación en caliente, procurando no excederse de temperatura, pues el almidón hidratado podría llegar a descomponerse.

A partir del almidón se obtienen distintos productos de interés alimentario. Mediante técnicas de lavado, maceración, molturación y centrifugado del maíz se obtiene la lechada de almidón; luego, por un proceso de hidrólisis y refino, se rompen las estructuras de la amilosa y la amilopectina. Por fin se obtiene, según el tratamiento, glucosa, o dextrosa en lenguaje culinario (por cristalización), maltodextrina (atomización), jarabes de glucosa (evaporación), polioles (hidrogenación) y caramelo (caramelización). El desarrollo de los métodos de aplicación enzimática ha permitido avanzar en todos los productos derivados del almidón.

*Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.*

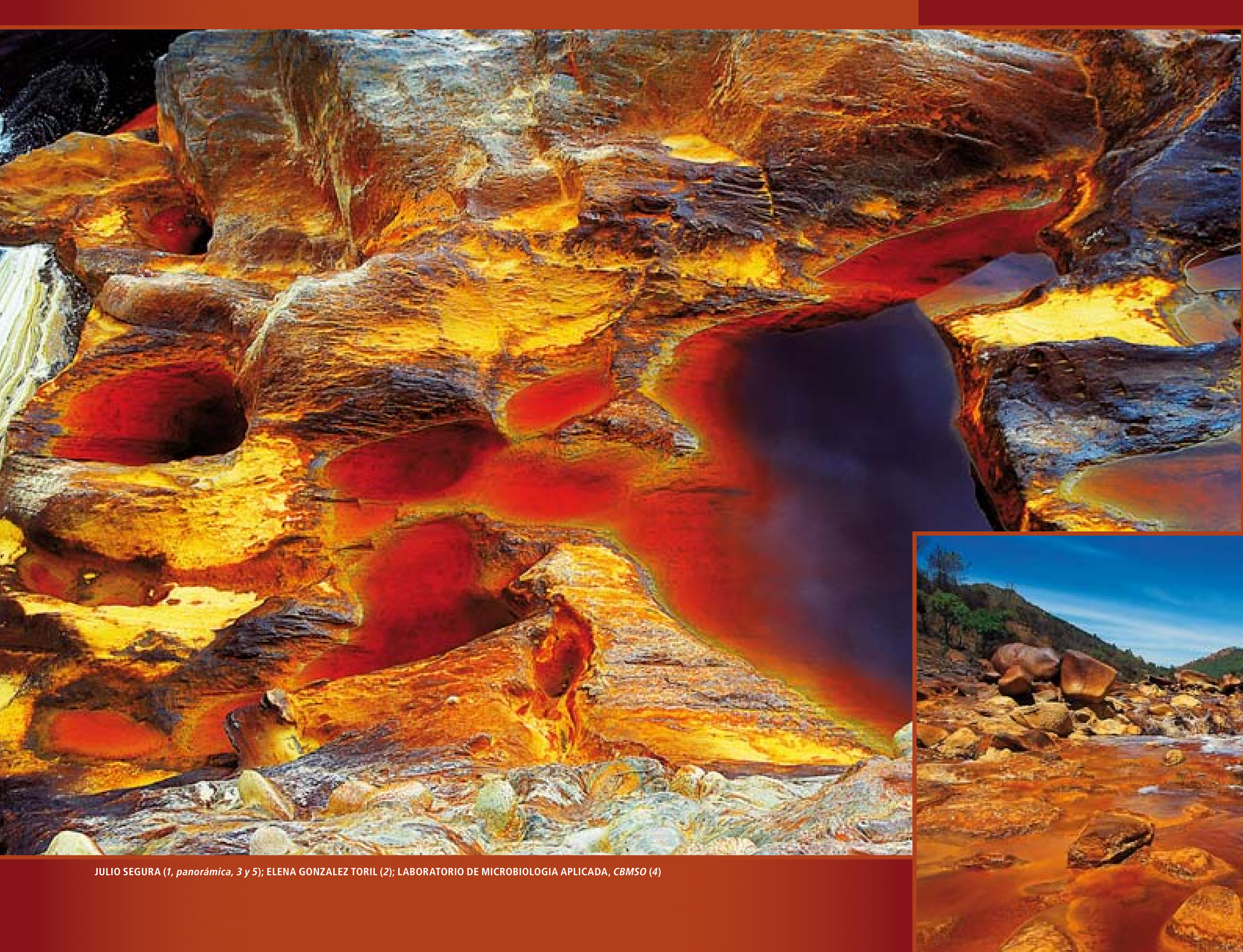
# Vida en el límite: acidófilos

Ricardo Amils y Alícia Duró

En el sudoeste de Andalucía, en Huelva, existe un extraño paisaje donde discurren aguas de color rojo. Es el río Tinto. Siempre se había pensado que era un río muerto, debido a la contaminación minera de la zona. El ambiente es extremadamente ácido y con concentraciones elevadas de metales pesados (hierro, cobre, arsénico, zinc, níquel y cromo, entre otros). Se creía que ningún organismo podría desarrollarse en esas condiciones, hasta que el análisis de las muestras reveló la presencia de microorganismos vivos. Como se lee en la hoja de ruta del Instituto de Astrobiología de la NASA: "La vida es mucho más robusta de lo que nunca pudimos imaginar: cuando tiene oportunidad, se desarrolla".

Se han recolectado muestras de rocas sedimentarias para datar su antigüedad, que ha resultado ser de varios millones de años. Ello demuestra que las condiciones del río precedieron a la actividad minera más antigua de la zona (5000 años). Análisis posteriores han revelado que las condiciones en que habitan los microorganismos del Tinto podrían corresponder a las existentes en el período Arcaico (hace unos 3500 millones de años). En esa época los volcanes empezaron a apagarse y los océanos estaban llenos de estromatolitos. El río Tinto reproduce, por tanto, condiciones extremas que permiten estudiar el origen y la evolución de la vida en la Tierra; asimismo, ofrece un excelente laboratorio para investigar las posibilidades de vida en Marte, el planeta rojo, el planeta del hierro.

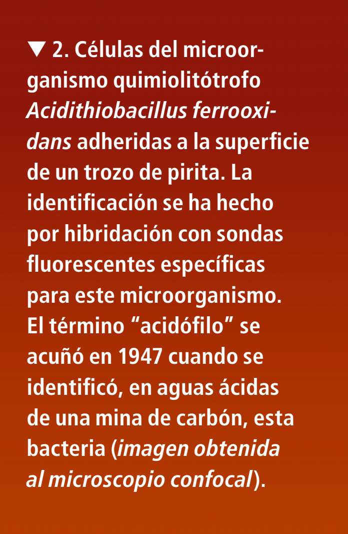
**▼ 1. El color rojo intenso del río Tinto se debe a la presencia de concentraciones elevadas de ion férrico en una solución de ácido sulfúrico. Estos son los productos del metabolismo quimiolitotrófico de los microorganismos que oxidan sulfuros metálicos (pirita), existentes en concentraciones elevadas en la Faja Pirítica Ibérica (Huelva).**



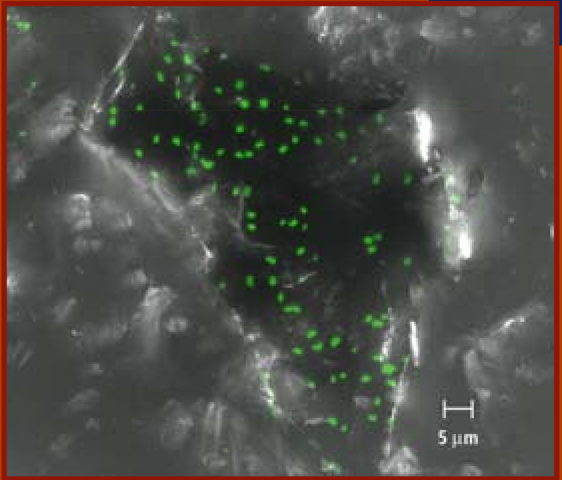
JULIO SEGURA (*1, panorámica, 3 y 5*); ELENA GONZALEZ TORIL (*2*); LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA APLICADA, *CBMSO* (*4*)



3. Se observa también la formación de estromatolitos de hierro. El metabolismo del hierro y la mineralogía asociada con el río guarda una estrecha relación con el estudio de las grandes formaciones de hierro bandeado (BIF) del Arcaico (micropaleontología) y con Marte (astrobiología).

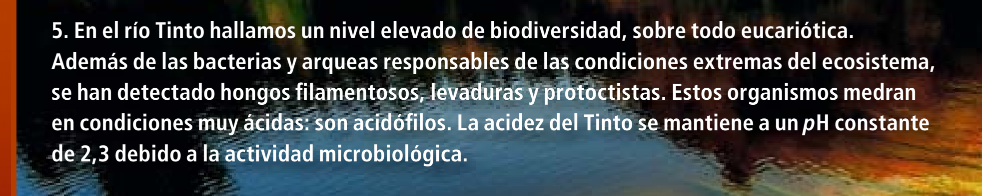


▼ 2. Células del microorganismo quimiolitótrofo *Acidithiobacillus ferrooxidans* adheridas a la superficie de un trozo de pirita. La identificación se ha hecho por hibridación con sondas fluorescentes específicas para este microorganismo. El término "acidófilo" se acuñó en 1947 cuando se identificó, en aguas ácidas de una mina de carbón, esta bacteria (*imagen obtenida al microscopio confocal*).






▶ 4. Fragmento de pirita masiva antes (*derecha*) y después (*izquierda*) de la acción de las bacterias. El sustrato inicial consta de inclusiones de pirita en la roca madre. Este material proviene de las Minas de Riotinto. La oxidación de los componentes de la pirita ($FeS_2$), mediada por los microorganismos, provoca la disolución de la misma; se observan los agujeros que ocupaba la pirita en el mineral.



5. En el río Tinto hallamos un nivel elevado de biodiversidad, sobre todo eucariótica. Además de las bacterias y arqueas responsables de las condiciones extremas del ecosistema, se han detectado hongos filamentosos, levaduras y protoctistas. Estos organismos medran en condiciones muy ácidas: son acidófilos. La acidez del Tinto se mantiene a un *p*H constante de 2,3 debido a la actividad microbiológica.



# BIOCARBURANTES *celulósicos*

Los residuos agrícolas, la madera y las gramíneas de crecimiento rápido se transforman en una enorme variedad de biocombustibles, incluidos carburantes para reactores. Para que los nuevos carburantes se generalicen, su precio habrá de competir con el del petróleo

George W. Huber y Bruce E. Dale

### CONCEPTOS BASICOS

- Los biocombustibles de segunda generación, derivados de partes no comestibles de las plantas, son los menos dañinos para el ambiente y los de mayor atractivo técnico como alternativa al petróleo.
- La mayoría de estos biocarburantes procederán de residuos agrícolas, como los tallos de maíz, cultivos energéticos y restos de maderas.
- En EE.UU., se podrían cultivar estas materias primas en cantidad suficiente para reemplazar cerca de la mitad del consumo total de petróleo sin que ello afectase a la producción alimentaria.

Debería ya estar claro que habría que salir de la esfera del petróleo. La dependencia del crudo entraña riesgos intolerables para la seguridad nacional, económica o ambiental. Pero la civilización no se detiene: es preciso descubrir un nuevo agente capaz de propulsar la flota mundial de vehículos. Los biocarburantes celulósicos —combustibles líquidos derivados de partes no comestibles de las plantas— ofrecen, a corto plazo, la alternativa al petróleo de mayor atractivo ambiental y viabilidad técnica.

Se pueden destilar biocarburantes a partir de cualquier cosa que sea, o alguna vez haya sido, vegetal. Los de la primera generación proceden de la biomasa comestible, principalmente maíz y soja (en EE.UU.), caña de azúcar (en Brasil) y remolacha y cereales (en Europa). Son los frutos más a mano en una selva de potenciales biocombustibles, dado que ya se domina la técnica necesaria (sólo en EE.UU. 180 refinerías obtienen hoy etanol a partir del maíz). Con todo, estos biocombustibles no son una solución duradera. Con el terreno cultivable existente sólo podrían producirse biocarburantes para cubrir el 10 por ciento de las necesidades de combustible líquido de los países desarrollados.

Al exigir cosechas mayores, la alimentación del ganado se encarece y suben los precios de algunos comestibles, aunque no tanto, ni mucho menos, como la prensa quiso hacer creer el año pasado. Y una vez contabilizadas las emisiones totales que conlleva el cultivo, recolección y tratamiento del maíz, es innegable que los biocombustibles de la primera generación no son tan benéficos para el medio como quisiéramos.

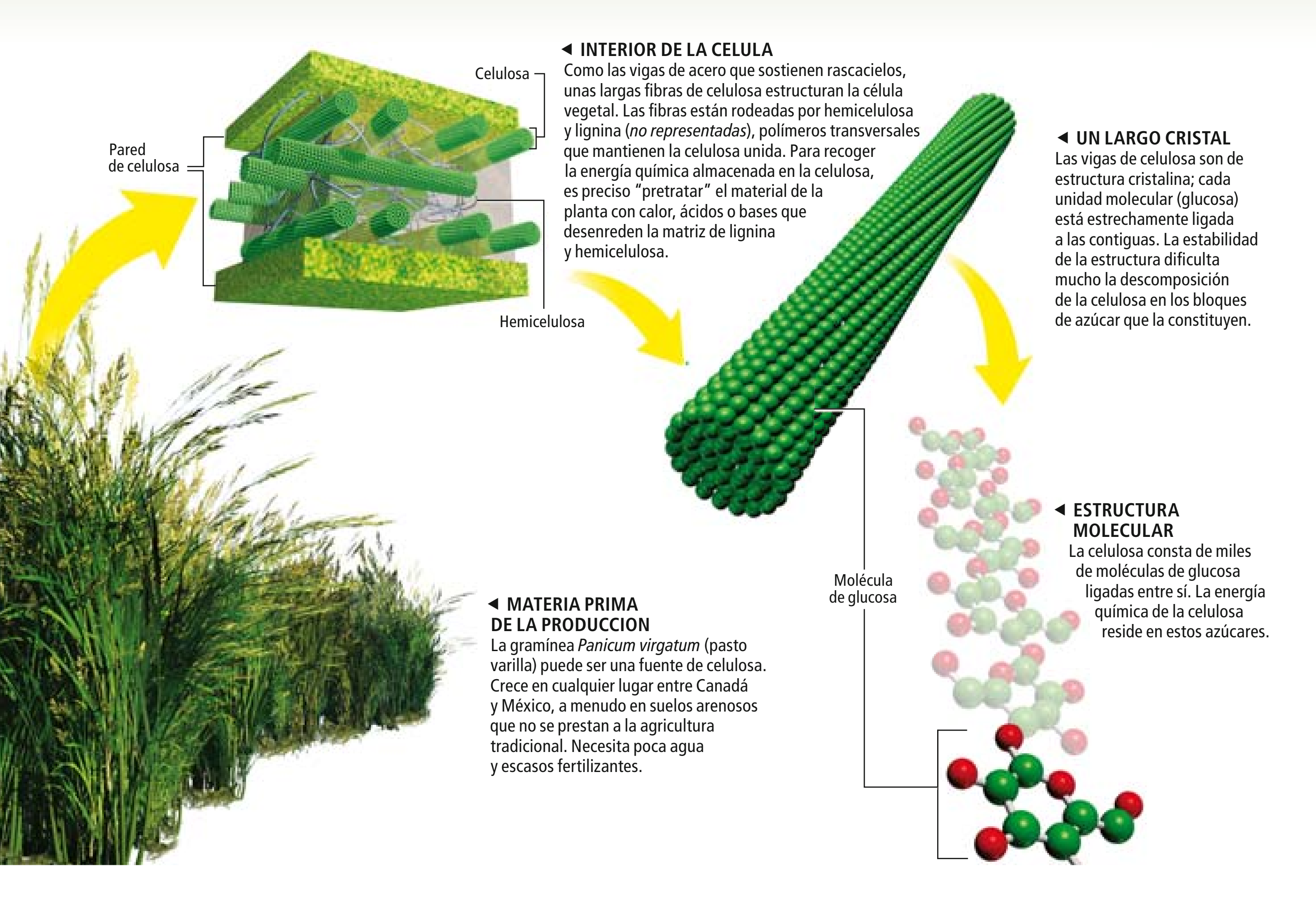
Estos inconvenientes pueden evitarse con los biocarburantes de la segunda generación, derivados de materiales celulósicos. Sus fuentes son muy numerosas: residuos de madera como el serrín y residuos de la construcción, agrícolas como los tallos de maíz y las pajas del trigo, y los "cultivos energéticos", esto es, plantas de crecimiento rápido y material leñoso expresamente sembradas para la producción del biocarburante (*véase el recuadro* "Posibles materias primas para la producción de celulosa en EE.UU."). Estos materiales cuestan poco (apenas unas decenas de euros por la energía equivalente a un barril de crudo), son abundantes y no afectan a la producción de alimentos.

La mayoría de los cultivos energéticos pueden crecer en tierras marginales, no destinadas a la explotación agropecuaria. Algunos de ellos, como el de renovales de sauce de rotación breve, a medida que crecen descontaminan el suelo ensuciado con aguas residuales o metales pesados.



# Un andamiaje de celulosa

En la naturaleza, la celulosa sustenta el crecimiento vertical de una planta. Posee una estructura molecular cristalina, rígida y muy resistente a la descomposición. Estas características dan firmeza a la planta, pero ponen inconvenientes a quienes desean convertirla en combustible.




Es posible recolectar de manera sostenible enormes cantidades de biomasa para la producción de carburantes. Según un estudio del Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía de EE.UU., ese país puede producir al menos 1200 millones de toneladas de biomasa celulósica seca por año sin que por ello disminuya la biomasa disponible para alimentación humana, la del ganado y las exportaciones. Se podrían obtener así más de 400.000 millones de litros de biocarburante al año: cerca de la mitad del consumo anual actual de gasolina y diésel en EE.UU. (*véase gráfico en el recuadro antes citado*).

Análogamente, se estima que la biomasa de celulosa producida en el mundo equivaldría por año a la energía que contienen entre 34.000 millones y 160.000 millones de barriles de petróleo (el consumo actual es de sólo 30.000 millones de barriles). Biomasa que también puede convertirse en cualquier tipo de combustible: etanol, gasolina ordinaria, diésel e incluso carburante para aviones a reacción.

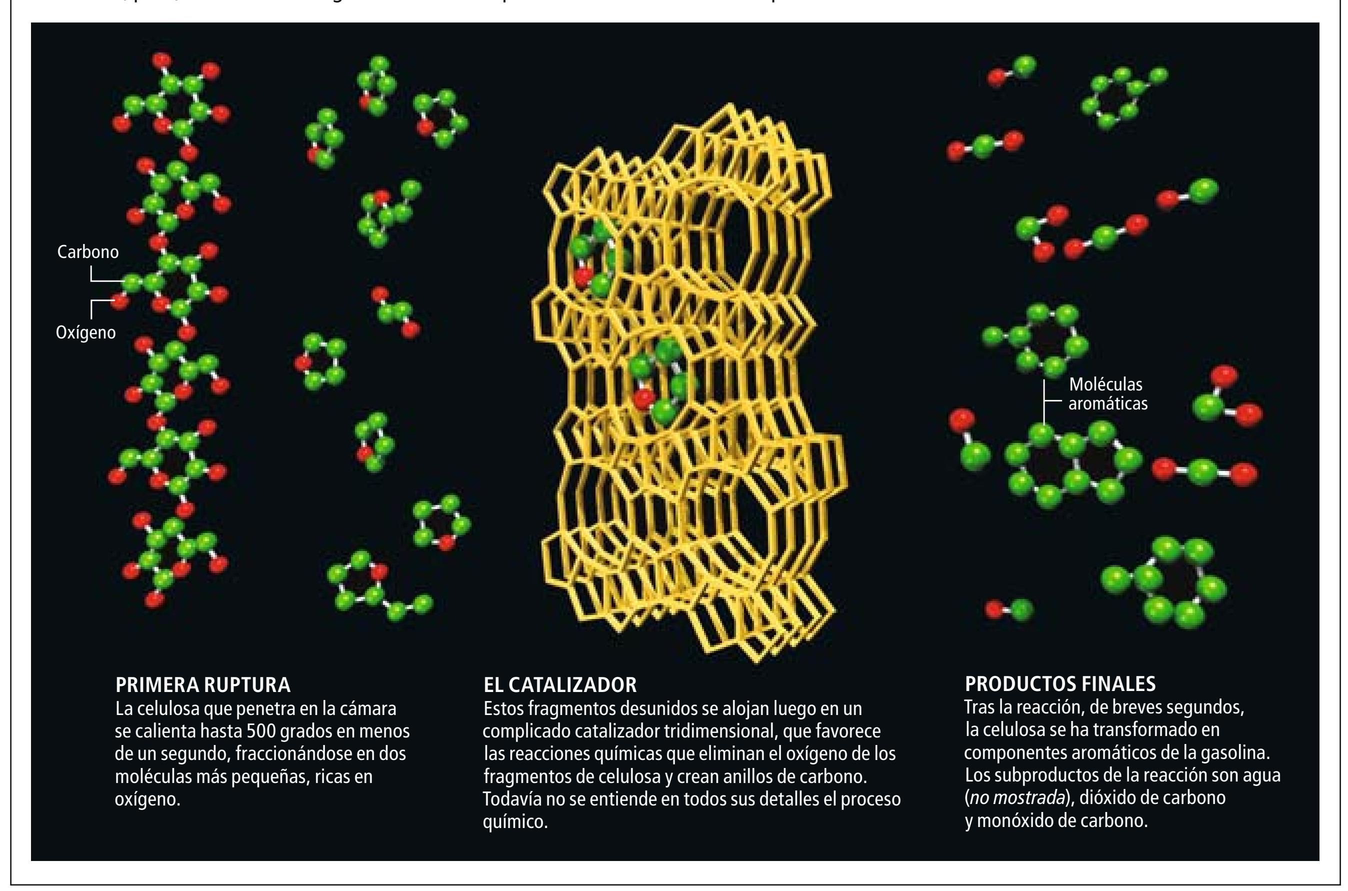
Todavía resulta mucho más fácil fermentar los granos de maíz que descomponer los duros tallos de celulosa, pero últimamente se han logrado grandes progresos. Los ingenieros químicos disponen de potentes modelos de computación químico-cuánticos para construir estructuras capaces de controlar las reacciones a nivel atómico. La investigación se propone extender pronto las técnicas de conversión al ámbito de las refinerías. Pese a la relativa novedad del campo, funcionan ya varias plantas de demostración. En 2011 deben terminarse las primeras refinerías comerciales. La era del carburante celulósico está ya a nuestro alcance.

## El cerrojo de la energía

La culpa es de la evolución. El fin natural de la celulosa es formar la estructura de una planta. Consiste en andamios rígidos de moléculas trabadas que sirven de apoyo al crecimiento

## CONVERSION DIRECTA DE LA CELULOSA EN COMBUSTIBLE

La celulosa se compone de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno (*el hidrógeno no se representa*). La gasolina está formada por carbono e hidrógeno. La conversión de la celulosa en biocarburante consiste, pues, en eliminar el oxígeno de la celulosa para conseguir moléculas de alta densidad de energía que sólo contengan carbono e hidrógeno. En el proceso de pirolisis catalítica rápida que se ilustra, la celulosa se descompone y convierte en gasolina en una sola etapa.




**PRIMERA RUPTURA**
La celulosa que penetra en la cámara se calienta hasta 500 grados en menos de un segundo, fraccionándose en dos moléculas más pequeñas, ricas en oxígeno.

**EL CATALIZADOR**
Estos fragmentos desunidos se alojan luego en un complicado catalizador tridimensional, que favorece las reacciones químicas que eliminan el oxígeno de los fragmentos de celulosa y crean anillos de carbono. Todavía no se entiende en todos sus detalles el proceso químico.

**PRODUCTOS FINALES**
Tras la reacción, de breves segundos, la celulosa se ha transformado en componentes aromáticos de la gasolina. Los subproductos de la reacción son agua (*no mostrada*), dióxido de carbono y monóxido de carbono.

DON FOLEY

vertical (*véase el recuadro* "Un andamiaje de celulosa") y resisten tenazmente el desmoronamiento biológico. Para liberar la energía que encierran, hay que desenredar el nudo molecular creado por la evolución.

En general, el proceso empieza por descomponer la biomasa sólida en moléculas más pequeñas, que luego se refinan para obtener combustibles. Los métodos suelen clasificarse por temperaturas. El método de baja temperatura (de 50 a 200 grados centígrados) produce azúcares susceptibles de fermentar en etanol y otros combustibles, de modo muy parecido al actual tratamiento de las cosechas de maíz y caña de azúcar. A temperaturas más altas (de 300 a 600 grados) se obtiene un biopetróleo que se refinará para producir gasolina o diésel. Y a temperaturas muy altas (por encima de 700 grados), se genera un gas que puede transformarse en combustible líquido.

Por ahora no se sabe cuál será el método que convertirá en biocarburante líquido la máxima cantidad de energía almacenada al coste más bajo posible. Tal vez haya que seguir caminos distintos para diferentes materiales de biomasa celulósica. El tratamiento a temperaturas altas podría ser óptimo para las maderas, mientras que las temperaturas más bajas irían mejor para las hierbas.

### Syngas

El proceso de obtención de syngas a alta temperatura es el método técnicamente más elaborado para producir biocarburantes. El syngas (gas de síntesis) es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno que se puede obtener de cualquier material que contenga carbono. Su transformación en combustible diésel, gasolina o etanol suele realizarse a través del proceso de síntesis Fischer-Tropsch, desarrollado por científicos alemanes en los años veinte del pasado siglo. Durante la Segunda Guerra Mundial, el Tercer Reich obtuvo de esa manera combustible líquido a partir de las reservas de carbón alemanas. La mayoría de las grandes compañías petroleras todavía poseen los medios para efectuar la conversión a syngas y podrían recurrir a



**ENERGIA DE LOS INSECTOS: Las termitas son modelo de factoría de biocombustibles. Los microorganismos que habitan en su interior descomponen la celulosa en azúcares. Los ingenieros biológicos tratan de repetir el proceso a escala industrial.**

ellos si la gasolina se encareciera prohibitivamente.

El primer paso para crear un syngas es la gasificación. La biomasa se introduce en un reactor y se calienta a temperaturas superiores a 700 grados. Seguidamente, se mezcla con vapor u oxígeno para producir un gas que contiene monóxido de carbono, hidrógeno gaseoso y alquitranes. Una vez eliminados estos últimos, se comprime el gas hasta una presión de 20 a 70 atmósferas. El syngas comprimido pasa luego por un catalizador especial: un material sólido que retiene las moléculas individuales y favorece determinadas reacciones químicas. La industria petroquímica ha desarrollado semejante tipo de catalizadores con el fin primordial de obtener combustibles a partir del gas natural y del syngas derivado del carbón vegetal, pero funcionan igualmente bien con la biomasa.

El procedimiento no encierra secretos, pero los reactores resultan caros. La planta de síntesis Fischer-Tropsch construida en Qatar en 2006 para convertir gas natural en 34.000 barriles de combustible líquido al día costó 1600 millones de dólares. Una planta de biomasa que costase otro tanto consumiría en torno a 5000 toneladas de biomasa por día durante un período de 15 a 30 años para producir combustible en cantidad suficiente para recuperar la inversión. Dadas las dificultades de orden logístico y económico que supone acopiar tamaña biomasa en un solo lugar, las investigaciones sobre el syngas se encaminan a reducir los costes de capital.

## Los autores

**George W. Huber** enseña ingeniería química en la Universidad de Massachusetts en Amherst. En 2003 sus trabajos sobre la obtención de hidrógeno a partir de biomasa fueron citados entre los 50 más relevantes del año. Es el fundador de Anellotech y asesor ocasional de empresas de petróleo y biocarburantes. **Bruce E. Dale**, profesor y ex director del departamento de ingeniería química de la Universidad estatal de Michigan, pertenece al Centro de Investigaciones Bioenergéticas de los Grandes Lagos (greatlakesbioenergy.org). También es asesor ocasional de las industrias de biocarburantes.

## Petróleo biológico

Durante miles de millones de años, la presión y el calor subterráneo transformaron el zooplancton y las algas del Cámbrico en los campos petrolíferos de hoy. Un proceso similar —infinitamente más breve— permitiría convertir biomasa celulósica en biocrudo. La biomasa se calienta en la refinería hasta temperaturas de 300 a 600 grados en un entorno libre de oxígeno; el calor la descompone en un sólido semejante al carbón vegetal y en biopetróleo, desprendiéndose además cierta cantidad de gas. El biopetróleo así obtenido constituye el biocarburante más barato hoy a la venta, quizás a unos diez céntimos de euro la cantidad equivalente en energía a un litro de gasolina, a lo que habría que añadir el coste de la biomasa original.

El proceso puede, además, realizarse en factorías de dimensiones moderadas, próximas al lugar de recolección de la biomasa, lo que reduce los gastos de transporte. Por desgracia, este crudo es muy ácido, insoluble en los carburantes derivados del petróleo y sólo contiene la mitad de energía que la gasolina. Aunque se pueda utilizar directamente en un motor diésel, éste quedará luego inservible.

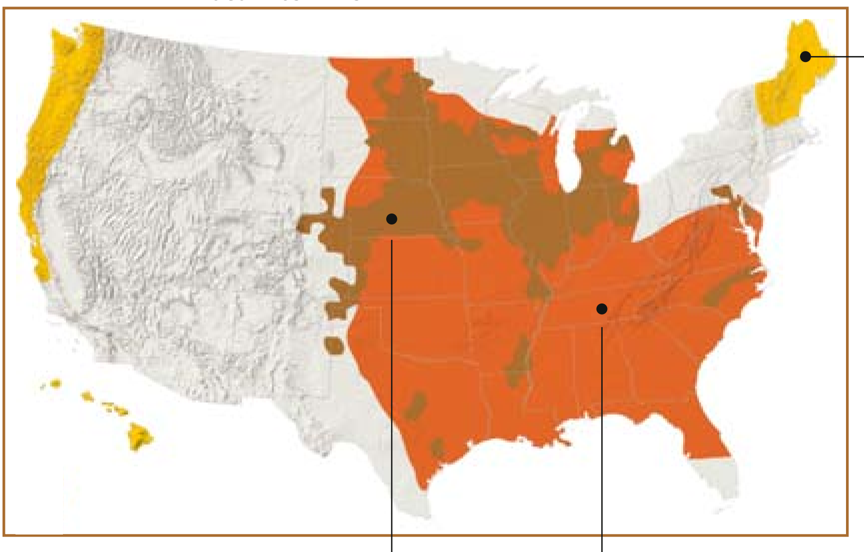
Las refinerías de petróleo podrían, sin embargo, convertir ese crudo biológico en un combustible adecuado. Hay compañías que estudian cómo adaptar a esa labor sus instalaciones. Algunas ya producen una forma diferente de combustible diésel ecológico, lo que da a entender que las refinerías podrían también manipular el crudo celulósico. Ahora están ya procesando a la vez aceites vegetales, grasas animales y petróleo. ConocoPhillips ha exhibido recientemente este método en una refinería de Borges (Texas); obtiene más de 45.000 litros de diésel por día a partir de sebo de vacuno recibido de un matadero cercano, de Tyson Foods (*véase el recuadro* “El sebo también vale”).

Se investigan, asimismo, las posibilidades de realizar de una vez las dos etapas del proceso, lo que para los químicos vendría a ser “guisar en la misma olla”: la biomasa sólida se convierte en crudo y el crudo en combustible dentro de un solo reactor. Uno de los autores (Huber) desarrolla, junto con sus colaboradores, un método llamado “pirolisis

# Posibles materias primas para la producción de celulosa en EE.UU.

Una vez lograda la conversión eficaz de materiales celulósicos en combustible, no van a faltar las materias primas vegetales necesarias para abastecer la producción. Al principio de esta década, un estudio del Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía de EE.UU. afirmaba que el país podría producir unos 1200 millones de toneladas de material celulósico al año sin afectar a las exportaciones ni al suministro de alimentos. Además de los cultivos energéticos que se extenderían por gran parte de EE.UU. —sobre todo en terrenos no suficientemente fértiles para sostener cultivos alimentarios tradicionales—, el nordeste y el noroeste podrían aportar residuos de la tala de árboles, y los restos de la recolección de maíz y de soja (incluso los tallos del maíz y las mazorcas sin los granos) darían energía a gran parte del Medio Oeste.

### TIERRA FERTIL PARA BIOCOMBUSTIBLES

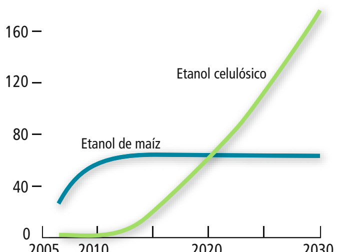
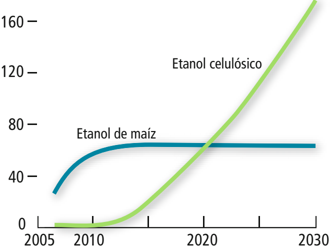


**PRODUCTOS FORESTALES**
El suministro de madera podría venir de dos fuentes principales: residuos abandonados de la tala de árboles e industrias papeleras, y el exceso de árboles de pequeño diámetro que el Servicio Forestal de EE.UU. ha dispuesto que deben eliminarse para mejorar la conservación de los bosques.

**RESIDUOS AGRICOLAS**
Los tallos, hojas y mazorcas residuales del cultivo del maíz constituyen la mitad aproximada de la cosecha total. Parte de estos residuos han de dejarse en el campo para regenerar el suelo, pero en su mayoría van a la basura.

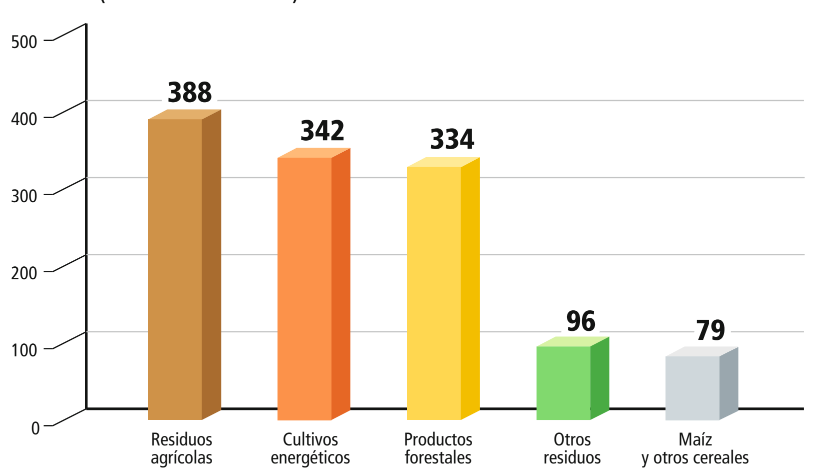
**CULTIVOS ENERGETICOS**
Son plantas que crecen deprisa con mínima necesidad de fertilizantes y agua. Sirven de ejemplo el pasto varilla, el sorgo, el miscanthus y la caña energética. Algunos, como los renovales de sauce de rotación breve, no sólo crecen en suelos contaminados con aguas residuales o metales pesados, sino que al mismo tiempo los van limpiando.

### CAPACIDAD DE PRODUCCION DE ETANOL EN EE.UU. (miles de millones de litros)

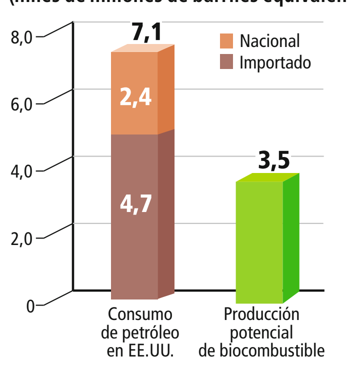




EE.UU. está a punto de llegar a su capacidad máxima de producción de etanol derivado del maíz, según un estudio publicado por los Laboratorios Nacionales Sandia. Sin embargo, el etanol obtenido de la celulosa puede seguir aumentando durante decenios.

### PRODUCCION SOSTENIBLE DE MATERIAS PRIMAS DE BIOCOMBUSTIBLES EN EE.UU. (millones de toneladas)




### CONSUMO ACTUAL DE PETROLEO Y PRODUCCION POTENCIAL DE BIOCOMBUSTIBLE (miles de millones de barriles equivalentes)

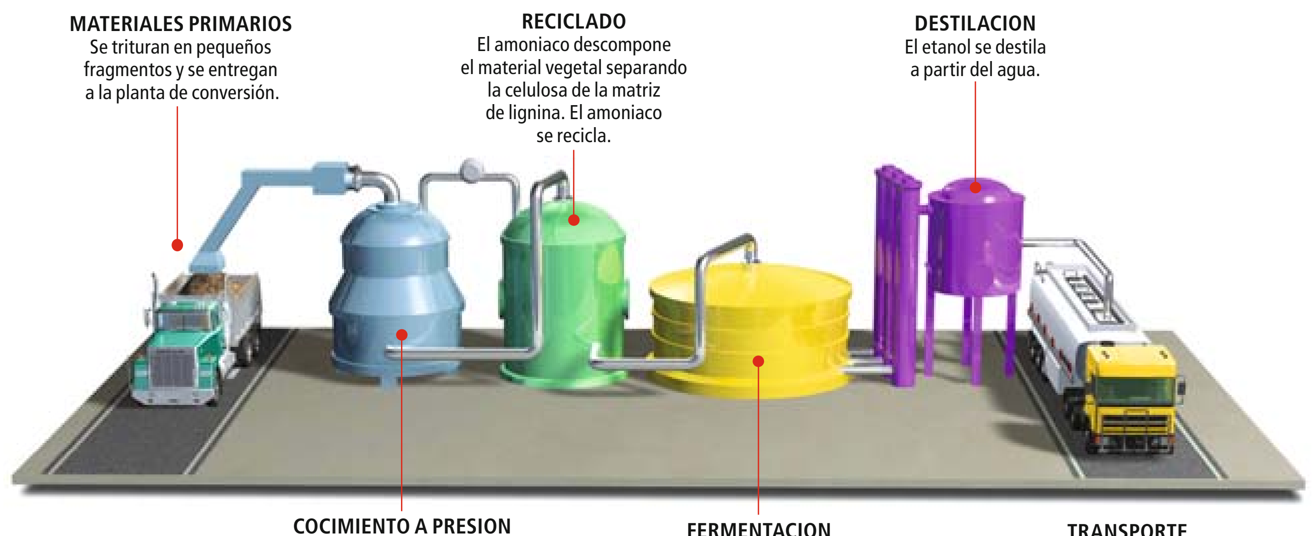



La producción potencial de biocombustible se iguala a la producción máxima de petróleo en EE.UU., que se alcanzó en 1970.

LAURIE GRACE; PETER ESSICK *Getty Images (bosque)*; VAST PHOTOGRAPHY *Getty Images (tallos de maíz)*; WALLY EBERHART *Getty Images (pasto varilla)*

## SEPARACION DE LA CELULOSA MEDIANTE AMONIACO

Aunque haya muchas maneras de pretratar las fibras vegetales para obtener celulosa —los ácidos y el calentamiento son las más usuales—, la expansión de las fibras mediante amoniaco (proceso AFEX) ofrece una singular combinación de baja demanda de energía, bajos costes y alto rendimiento.




DON FOLEY

catalítica rápida". Lo de "rápida" proviene del calentamiento inicial: una vez dentro del reactor, la biomasa se cuece a 500 grados en un segundo, con la descomposición consiguiente de las moléculas grandes en otras más pequeñas. A la manera de huevos en hueveras, estas moléculas pequeñas tienen la forma y el tamaño adecuados para encajar en la superficie de un catalizador.

Ya asentadas en los poros del catalizador, las moléculas experimentan una serie de reacciones que las convierten en gasolina, concretamente en los componentes aromáticos de alto valor de la gasolina que aumentan el octanaje. (Los combustibles de alto octanaje permiten que los motores funcionen a presiones internas más elevadas, lo que aumenta su rendimiento.) El proceso completo dura de dos a 10 segundos nada más. Ya se ha creado una empresa, Anellotech, que trata de llevar este proceso desde el laboratorio hasta la escala comercial. Espera tener una instalación operativa para 2014.

### La solución del azúcar

Hasta ahora, el método que ha logrado atraer la mayoría de las inversiones públicas y privadas depende de un mecanismo más corriente: liberar los azúcares contenidos en las plantas, para fermentarlos luego y obtener etanol u otros biocarburantes. Se han estudiado ya docenas de posibles maneras de descomponer la celulosa y la hemicelulosa —fibras que aglutinan la celulosa en el interior de las células— en sus azúcares componentes. A la biomasa se la puede calentar, irradiar con rayos gamma, molturar hasta convertirla en una lechada fina o tratar con vapor a alta temperatura, empaparla con ácidos o bases concentradas o bañarla en disolventes. Cabe incluso preparar genéticamente microorganismos que fagociten y degraden la celulosa.

Por desgracia, muchas de las técnicas que dan buenos resultados en el laboratorio resultan inoperantes para la práctica comercial. Para que fuesen viables, los pretratamientos deberían generar azúcares de fácil fermentación, en grandes cantidades y concentraciones con unos costes de capital moderados. No deberían utilizarse materiales tóxicos, ni consumirse demasiada energía. Asimismo, el precio del biocombustible producido tendría que competir con el de la gasolina corriente.

Los métodos más prometedores consisten en someter la biomasa a valores extremos de *p*H y temperatura. En uno de nuestros laboratorios (el de Dale) desarrollamos un proceso basado en la expansión de las fibras mediante amoniaco (AFEX, por sus siglas en inglés). La biomasa celulósica se cuece a 100 grados con amoniaco concentrado bajo presión; al liberar la presión, el amoniaco se evapora y se recicla. A continuación, las enzimas convierten en azúcares al menos el 90 por ciento de la celulosa y la hemicelulosa tratadas. La razón de un rendimiento tan alto es haber reduci-

do al mínimo la degradación del azúcar que ocurre a menudo en ambientes ácidos o de temperatura elevada.

El proceso AFEX va “de seco a seco”. La biomasa comienza como un sólido en buena medida seco y, al final del tratamiento, queda seca, no diluida en agua. Pueden así obtenerse grandes cantidades de etanol muy concentrado, de alta graduación.

Este proceso puede, además, resultar muy económico. En el supuesto de que el suministro de biomasa a la planta transformadora cueste alrededor de 40 euros por tonelada, se ha calculado que el pretratamiento AFEX, combinado con un avanzado proceso de fermentación —el llamado “bioprocesamiento consolidado”—, puede producir etanol celulósico a un coste aproximado de unos 0,20 euros la energía de un litro de gasolina; probablemente podría venderse en el surtidor a menos del doble de esa cifra.

## El coste del cambio

Sin duda, el coste será determinante en la rapidez con que se difundan los combustibles celulósicos. Su principal competidor es el petróleo, cuya industria recoge los frutos de más de un siglo de programas de investigación especializados. Y, además, la mayoría de las refinerías petrolíferas en servicio han amortizado ya sus costes de capital iniciales; los nuevos biocarburantes, en cambio, necesitarán inversiones de cientos de millones de dólares, costes que durante años tendrán que integrarse en el precio del carburante producido.

Por otra parte, los biocarburantes de celulosa ofrecen grandes ventajas sobre el petróleo y otras alternativas, como las arenas petrolíferas y el carbón licuado. Ante todo, se parte de materias primas mucho menos costosas que el crudo en estado bruto, lo que debe ayudar a mantener bajos los costes una vez puesta en marcha la industria. El biocarburante será de producción nacional, con los consiguientes beneficios en cuanto a seguridad. Y es mucho más respetuoso con el ambiente que cualquier producto basado en combustibles fósiles.

Por si esto fuera poco, las nuevas técnicas de análisis y simulación informática permitirán construir refinerías biológicas que funcionen mejor y con mayor eficacia antes de lo que habría sido posible hace sólo diez años. Comprendemos ahora más a fondo las propiedades de los materiales primarios utilizados y los procesos por los que se convierten en combustible a un ritmo en constante aumento. El apoyo que presta el gobierno estadounidense a la investigación de formas de energía alternativas debería servir para acelerar aún más ese proceso. El plan de estímulo de la economía, firmado por el presidente Barack Obama, subvenciona con 800 millones de dólares el Programa de Biomasa del Departamento de Energía. Su objeto es impulsar la investigación y desarrollo de biocarburantes avanzados y proveer financiación para proyectos de biorrefinerías a gran escala. Contiene además garantías de créditos por valor de 6000 millones de dólares a “proyectos de vanguardia en biocombustibles” que empezarán a realizarse hacia el mes de octubre de 2011.

Es evidente que, si EE.UU. mantiene su actual compromiso con los biocombustibles, se superarán con facilidad los retos logísticos e industriales que hoy afronta el sector. Las técnicas de conversión de la biomasa se trasladarán del laboratorio al mercado en un plazo de 5 a 15 años, y crecerá espectacularmente el número de vehículos propulsados por biocarburantes celulósicos. El uso de este nuevo carburante puede cambiar el mundo en sus cimientos; lo hemos esperado largo tiempo.

## El sebo también vale

Una nueva tendencia consiste en elaborar combustibles a partir del sebo. High Plains Bioenergy ha abierto una biorrefinería contigua a una planta de derivados porcinos de Guymon, Oklahoma. La refinería acepta la grasa del cerdo —un subproducto abundante y de escaso valor del proceso de matanza industrial— y, junto con aceites vegetales, la transforma en biodiésel. Se espera que esta instalación procese cada año alrededor de 110 millones de litros de grasa y fabrique el mismo volumen de biodiésel. En 2010, a la planta de High Plains se unirá otra en Geismar, explotada por Dynamic Fuels, empresa mixta formada por Tyson Foods y Syntroleum. En ella se utilizará la grasa procedente de las operaciones cárnicas de vacuno, porcino y aviar para obtener unos 280 millones de litros al año de biodiésel y combustible para reactores.

La industria del biodiésel ha sufrido recientes mermas de actividad por la falta de demanda. Al descender los precios del crudo, los combustibles diésel de petróleo resultan más baratos que el biodiésel, que en EE.UU. suele derivarse de aceites de soja y vegetales. La deducción de un dólar por galón (cerca de cuatro litros) en los impuestos federales ha ayudado a suavizar el golpe, pero esta deducción debe expirar al final de este año. Hay fabricantes que temen ver desaparecer su empresa en ese mismo momento. Tyson se había asociado anteriormente con ConocoPhillips para producir biodiésel en una refinería que explotaba en Borges, Texas. Pero la inseguridad sobre la situación de la pausa fiscal deja en dudas el proyecto.

PETER CADE *Getty Images*

## Bibliografía complementaria


BREAKING THE CHEMICAL AND ENGINEERING BARRIERS TO LIGNOCELLULOSIC BIOFUELS. Plan del seminario “De la biomasa a los biocombustibles”: www.ecs.umass.edu/biofuels

DEVELOPMENT OF CELLULOSIC BIOFUELS. Videoconferencia de Chris Somerville, director del Instituto de Biociencias de la Energía en la Universidad de California, Berkeley: http://tinyurl.com/grassoline

Programa de Biomasa del Departamento de Energía de EE.UU.: http://eere.energy.gov/biomass

# Los orígenes del telescopio

*Ya en la Antigüedad, el uso de espejos se encontraba muy extendido. Las gafas de lectura fueron inventadas en Italia en el siglo XIII y comenzaron rápidamente a fabricarse en masa. Pero hubo que esperar trescientos años para el advenimiento del telescopio*

**Sven Dupré**

### CONCEPTOS BASICOS

- El sueño de disponer de un dispositivo que posibilitase el aumento óptico de imágenes contaba con una larguísima historia cuando, a principios del siglo XVIII, Hans Lipperhey, de Middelburg, solicitó en vano una patente para su telescopio.
- La invención del telescopio hubo de esperar hasta principios del siglo XVII porque hasta la centuria precedente las lentes cóncavas y convexas no alcanzaron la calidad requerida para la fabricación de este instrumento. La solicitud de patente de Lipperhey fue rechazada; por una razón de peso: una vez conocido su diseño, el telescopio holandés era demasiado fácil de copiar.
- Un entendimiento teórico del telescopio óptico sólo apareció con su posterior desarrollo experimental.

El 25 de septiembre de 1608, Hans Lipperhey, fabricante de lentes, viajaba a La Haya desde la ciudad holandesa de Middelburg con el propósito de patentar "cierto instrumento para ver de lejos" (el término *telescopio* sólo sería acuñado por la Accademia dei Lincei en Roma en 1611, es decir, con posterioridad a las observaciones celestes de Galileo). Lipperhey fue autorizado a presentar su invento ante el príncipe Mauricio, comandante en jefe del ejército holandés, así como ante los Consejos de las diferentes provincias de la entonces emergente República de Holanda. El 2 de octubre, los Estados Generales estudiarían la patente de Lipperhey, a quien acto seguido se le ordenó la elaboración de un telescopio mejorado para el que debía emplear, en lugar de vidrio, cristal de roca. Quizá pueda interpretarse como un indicio de la mala calidad de las lentes. Se le encargó, asimismo, la fabricación de un binocular. Lipperhey recibió 300 florines y se le prometió aún más dinero si entregaba un instrumento que satisficiese las expectativas de los Estados Generales. La patente, sin embargo, nunca le sería concedida.

La razón de este rechazo se debió a que, en el plazo de tres semanas, aparecerían otros dos que reclamarían también para sí la invención del telescopio. Por un lado, Sacharias Jansen, del que se supone que era vecino de Lipperhey en Middelburg, presentaría ante los Estados Generales su propio telescopio. Por su parte, Jacob Metius, de la ciudad de Alkmaar, propondría en una carta dirigida a los Estados Generales la patente de un telescopio que, en sus propias palabras, había inventado tras una experimentación intensa con lentes, llevada a cabo durante los dos años anteriores. Los Estados Generales entenderían de inmediato la imposibilidad de mantener el invento en secreto y, seguramente, la facilidad con que se podría copiarlo. Puede que incluso hubiese ya otros instrumentos similares en circulación, razón suficiente para que los Estados Generales denegasen la patente a Lipperhey.

Estudios documentados han llevado al convencimiento de que la asignación de la paternidad del telescopio a Sacharias Jansen, que en tiempos recientes todavía ha encontrado partidarios, no era sino una consecuencia del nacionalismo y del orgullo local predominantes en el siglo XIX. A Jansen se le consideraba natal de Middelburg, ciudad de la provincia holandesa de Zelanda a la que Lipperhey, natural de Wesel (en la actual Renania del Norte-Westfalia), había emigrado en 1594. Como consecuencia de este sentimiento nacionalista, se optó por considerar al holandés Jansen inventor del telescopio. En todo caso, la primera prueba documentada de la existencia de un telescopio holandés la constituye la carta de recomendación de los Estados Generales que Lipperhey portaba consigo en su presentación en La Haya el 25 de septiembre de 1608. Pero, ¿convierte eso a Lipperhey en su verdadero inventor?

Los propios candidatos, familiarizados con las nociones de patentes y privilegios imperantes a principios del siglo XVII, trataron la cuestión de una manera completamente diferente a como lo haríamos hoy. Sin embargo, la paternidad del invento apenas es uno de



1. **ESTA ILUSTRACION de los *Emblemata of zinne-werck*, obra del escritor y político holandés Johan de Brune publicada en 1624, es una de las primeras representaciones de un telescopio. Es obra del pintor Adriaen van de Venne, que trabajó unos años en Middelburg, la ciudad natal de Brune y donde Hans Lipperhey construyó en 1608 el primer telescopio del que haya constancia fidedigna.**

los aspectos más interesantes de esta historia. Mayor relevancia adquiere la cuestión acerca de los conocimientos teóricos y prácticos que condujeron al nacimiento de ese instrumento.

La idea del telescopio no surgió en Middelburg a principios del siglo XVII. Ya en el siglo XIII, el filósofo inglés Roger Bacon (1214-1294) soñaba con un instrumento telescópico gracias al cual "un niño aparezca como un gigante y un hombre como una montaña". En opinión de Bacon, un instrumento semejante habría de ser sumamente práctico, pues con él podría observarse la aproximación de ejércitos enemigos. Las esperadas aplicaciones militares constituían el centro de la leyenda de la isla de Faro, en la antigua Alejandría. El rey Ptolomeo habría encargado instalar en el famoso faro de Alejandría, construido en la isla, un espejo cóncavo para "poder observar naves enemigas que deseen conquistar y saquear la tierra". Así al menos lo cuenta el napolitano Giovanni Battista Della Porta (*ca*. 1535-1615) en la segunda edición de su libro *Magia Naturalis* (1589).

Merece destacarse que esos textos atribuyan las propiedades telescópicas a los espejos cóncavos, no a las lentes. La leyenda del Faro es probablemente la encarnación más conocida de la catóptrica telescópica, es decir, la parte de la óptica que se ocupa de la reflexión de la luz. Quedó recogida en la obra *Sefer Masa'ot* ("Libro de viajes") de Benjamín de Tudela en el siglo XII; mucho antes de su traducción al latín en el año 1575, se contaba ya con otras menciones medievales de supuestos espejos telescópicos. Por el contrario, los telescopios cuya patente propusieron en vano Lipperhey y Metius se componían de una lente cóncava y de otra convexa.

Pero si la existencia de un instrumento de aumento telescópico era un sueño tan antiguo de la humanidad, ¿qué impidió que se hiciese realidad? ¿Por qué hubo que esperar a que en septiembre de 1608 un fabricante de lentes de Middelburg solicitase la patente de un telescopio? Esta demora, si podemos llamarla así, no cabe atribuirla completamente a las expectativas de que el funcionamiento de un telescopio debía basarse en espejos. Entonces, ¿cuáles fueron los otros impedimentos conceptuales y técnicos en el desarrollo del telescopio?

Esta pregunta, aparentemente sencilla, tiene una respuesta compleja, quizá demasiado compleja para que la actual investigación histórica pueda proporcionar una explicación satisfactoria. Es, sin embargo, posible mencionar algunos desarrollos decisivos, tanto en la teoría de la óptica como en la fabricación de lentes, especialmente durante los dos siglos anteriores a 1608.

## La "tradición perspectivista"

A principios del siglo XVII, la óptica era una disciplina matemática bien asentada cuya tradición provenía de la Antigüedad. Los fundamentos se remontan a Euclides (siglo IV a.C.) y a Claudio Ptolomeo (siglo I d.C.) En la Antigüedad, el principal objetivo de la óptica consistía en explicar nuestra percepción del mundo. La *Optica* de Euclides se limitaba a tratar el problema de la percepción directa.



**2. EL ESPEJO CONCAVO DE ARQUIMEDES destruye las naves enemigas de Siracusa. Este fresco de Giulio Parigi (alrededor de 1600) decora el *Stanzino delle Matematiche* en la Galería de los Oficios de Florencia.**

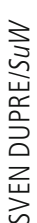
Ptolomeo, en algunos capítulos de su *Optica,* se ocupó de la catóptrica (la reflexión en superficies especulares) y de la dióptrica (la refracción en la superficie que separa dos medios transparentes). La ley de iguales ángulos de incidencia y de reflexión se atribuye a Herón de Alejandría (siglo I d.C.) Por su parte, Ptolomeo midió la refracción en diferentes medios, y llegó a elaborar tablas en las que se relacionaban diferentes ángulos de incidencia y refracción.

El trabajo claramente más relevante de la óptica perspectivista preclásica lo constituye el *Kitab al-Manazir* ("Libro de óptica"), escrito en el siglo XI por el matemático islámico Ibn al-Haytham (nuestro Alhacén). En Occidente, la traducción latina del trabajo de Ibn al-Haytham se convertiría rápidamente en la base sobre la que se establecería, en el siglo XIII, la óptica perspectivista. En la Edad Media, la óptica se conocía bajo el nombre de "perspectiva", motivo por el que los historiadores hablan con frecuencia de la "tradición perspectivista". Componen los cánones perspectivistas los trabajos de Roger Bacon, la *Perspectiva Communis* de John Peckham (1230-1292) y la *Perspectiva* de Witelo, un sabio polaco contemporáneo de los anteriores.

Ha de tenerse en cuenta que, a diferencia de la óptica geométrica moderna, la preocupación original de los perspectivistas consistía en entender la visión y la percepción visual. En sus discusiones sobre la reflexión y la refracción, los perspectivistas estaban únicamente interesados en la percepción de imágenes en espejos y esferas de cristal, por lo que estudiaron el comportamiento de la luz reflejada en un espejo o refractada en esferas de vidrio (el estudio de espejos cóncavos, tanto esféricos como parabólicos, tenía una larga y sólida tradición que se remontaba a la Antigüedad). Desde un punto de vista moderno, sin embargo, no deja de resultar sorprendente que, hasta mediados del siglo XVI, las investigaciones sobre espejos cóncavos y la determinación de sus puntos focales se considerasen completamente independientes del lugar en que se forma la imagen que puede percibirse en un espejo o en una esfera de cristal.

En el transcurso del siglo XVI, los textos de los perspectivistas se fueron haciendo muy accesibles en forma impresa. Por ejemplo, Georg Tannstetter y Petrus Apianus publicaron la primera edición impresa de la *Perspectiva* de Witelo (*véase la figura 3*). Fredric Risner imprimió en el año 1572 los trabajos de Ibn al-Haytham y Witelo en un mismo volumen, con lo que pudieron introducirse referencias cruzadas entre ambas obras.

En esta época tuvo lugar un renovado interés por los trabajos de óptica de la Antigüedad. Johannes Regiomontanus y, algo después, Georg Hartmann pensarían editar la *Optica* de Ptolomeo. El proyecto fracasaría debido a la complejidad de los fragmentarios manuscritos disponibles. Sin embargo, Hartmann conseguiría, en 1542, publicar la *Perspectiva Communis* de Peckham, edición que se convertiría en la base de todas las siguientes. La introducción de la perspectiva lineal en la pintura sería la causa



de una vuelta a la *Optica* de Euclides: Jean Pena publicó, en el año 1557, una edición muy influyente de esta obra junto con la *Catóptrica,* en aquel entonces atribuida Euclides. Hacia mediados del siglo XVI la óptica no sólo sería parte de los planes de estudio universitarios; también fuera de las universidades se harían accesibles al público general, especialmente en Italia, los textos canónicos de la tradición perspectivista.

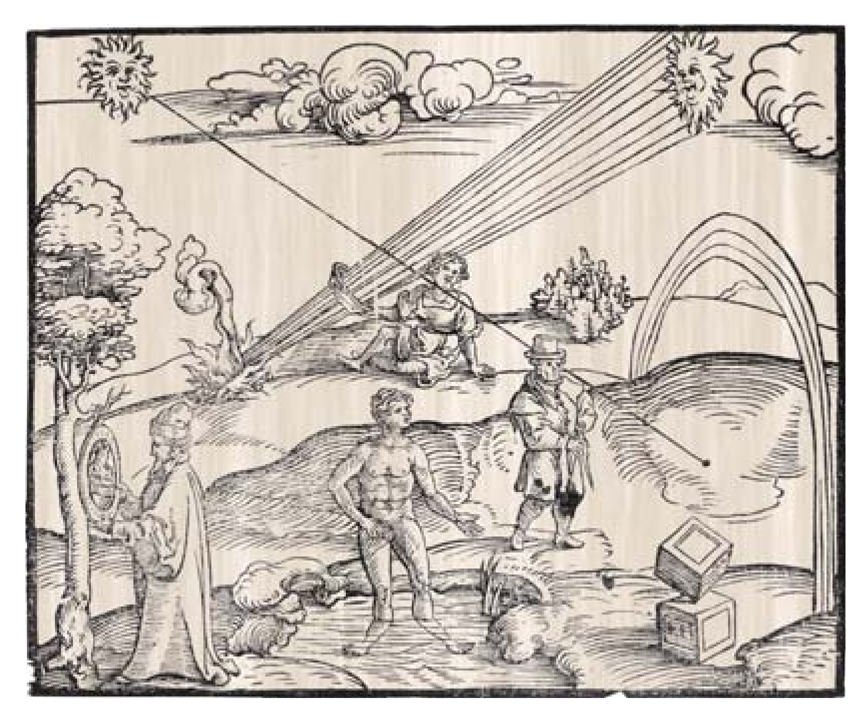
A mediados del siglo XVI, los matemáticos involucrados en la fabricación de espejos y otros instrumentos ópticos se esforzarían por entender las propiedades de espejos, lentes y de la *camera obscura* (consistente en un espacio cerrado y a oscuras provisto de un pequeño orificio en una de sus paredes, a través del cual se proyecta en la pared opuesta una imagen del exterior invertida tanto vertical como horizontalmente). Algunos de ellos estaban muy familiarizados con la tradición perspectivista. Sus intentos de entender las propiedades ópticas allanarían el camino hacia nuevas innovaciones (y confusiones) conceptuales.

A partir de una de tales innovaciones conceptuales (la introducción del concepto de *punctum inversionis*, del que hablaremos más adelante) aparecería, ya en el año 1580, la descripción de un instrumento telescópico. Sin embargo, su construcción se quedaría en punto muerto al no tener en cuenta las limitaciones de la época en la fabricación de lentes. Posteriores mejoras en la técnica del pulido de lentes posibilitarían la invención del telescopio holandés, también denominado galileano.

## Conocimiento práctico de espejos y lentes en el siglo XVI

El médico y matemático veneciano Ettore Ausonio (*ca.* 1520-1570), célebre por su espejo, se propuso unificar el problema de la determinación del punto focal y la percepción de imágenes en un espejo cóncavo. Ambos fenómenos habían sido tratados hasta entonces por separado.

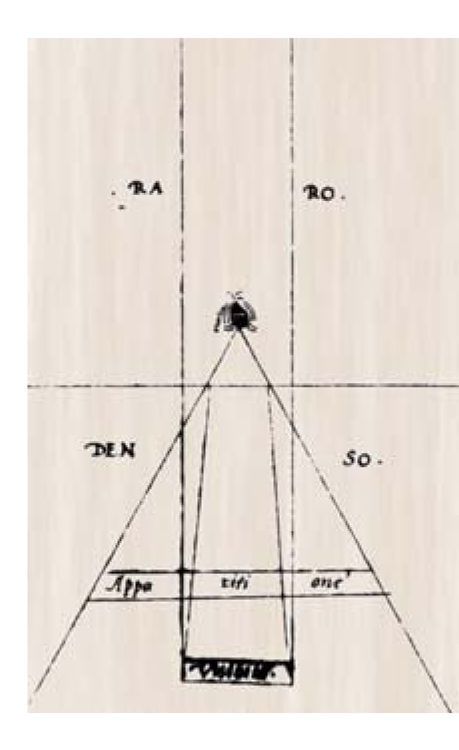
Poco después de que Della Porta hubiese publicado en 1558 la primera edición de su *Magia Naturalis,* Ausonio escribió una *Theorica Speculi Concavi Sphaerici,* que se publicaría en 1602, con algunas modificaciones, por el astrónomo Giovanni Antonio Magini, residente en Bolonia. El manuscrito original de Ausonio (sin los cambios introducidos por Magini) circularía entre finales del siglo XVI y principios del XVII. Hoy nos queda constancia del mismo en forma de una copia manuscrita perteneciente a Galileo. Ausonio introdujo en su *Theorica* el concepto que posteriormente Della Porta denominaría *punctum inversionis* en su obra *De Refractione* (1591).



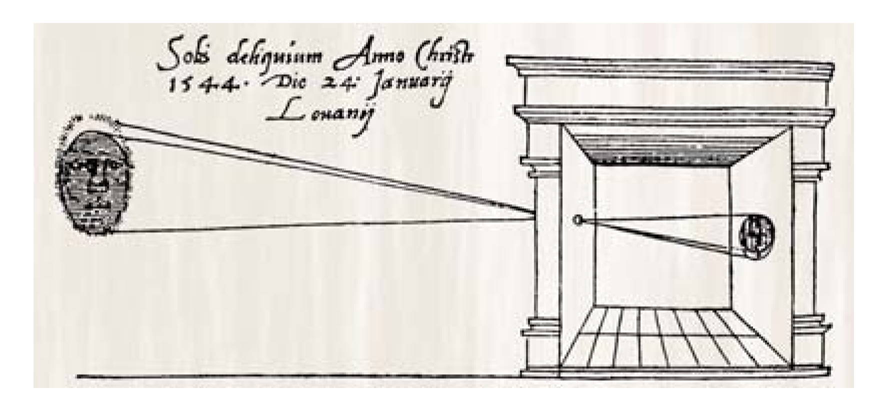
**3. ESTE FRONTISPICIO de la edición de Georg Tannstetter y Petrus Apianus de la *Perspectiva* de Witelo muestra problemas y elementos típicos de la óptica del siglo XVI, como el espejo cóncavo que prende el fuego. El ejemplar que mostramos apareció en Núremberg en 1535 de la mano del célebre editor Johannes Petreius.**

Ausonio identificó el punto focal de un espejo cóncavo con el "punto de inversión", y argumentó que, si bien es en este punto donde el ojo debería percibir una imagen ampliada al máximo, la misma también había de aparecer máximamente distorsionada. Gracias al concepto de *punctum inversionis* fue posible unificar las investigaciones sobre espejos cóncavos y las relativas a la percepción de imágenes en espejos. Estas innovaciones conceptuales sobrepasaban los límites del saber óptico y apuntaban, en cierto modo, hacia las tradiciones perspectivistas. El *punctum inversionis* debería más bien entenderse como un "saber óptico práctico", no sólo por haber sido introducido por matemáticos interesados en el diseño de espejos, sino también porque se basaba en un conocimiento empírico de las propiedades focales y de formación de imágenes en espejos cóncavos.

Desde la invención, a finales del siglo XIII, de las gafas con lentes convexas para corregir la presbicia (vista cansada) hasta Della Porta, las investigaciones sobre lentes se realizaron con ayuda de conceptos tomados de la tradición perspectivista de la óptica. No obstante, la percepción de imágenes a través de lentes sería tratada con total independencia de las "propiedades focales" de recolección de luz de las lentes convexas.




**4. EN SU OBRA *DELLA PROSPETTIVA*, Giovanni Fontana (1400-1450) explica el funcionamiento de las gafas mediante la analogía con el aumento que experimenta la imagen de un objeto sumergido en agua. El manuscrito perteneció temporalmente a Giovanni de Medici, quien, como Galileo, tomó lecciones de matemáticas de Ostilio Ricci.**




**5. EN SU OBRA *DE RADIO ASTRONOMICO ET GEOMETRICO* (1545), Reiner Gemma Frisius, profesor de matemáticas de la Universidad de Lovaina, explica la proyección del Sol en una *camera obscura* durante un eclipse de 1544.**

En *Della Prospettiva*, un manuscrito de mediados del siglo XV atribuido al médico y matemático Giovanni Fontana, las propiedades ópticas de las gafas se explicaban mediante los mismos principios que utilizó Ptolomeo para describir el aumento que experimentan los objetos bajo el agua (*véase la figura 4*). Este libro sería empleado por Ostilio Ricci, entre cuyos alumnos se encontraba Galileo, para impartir sus clases. El mérito de Della Porta fue justamente superar ese tipo de explicaciones al abordar el funcionamiento de las lentes.

Della Porta generalizó el concepto de *punctum inversionis* de los espejos cóncavos a las lentes convexas. En su obra *De Refractione* (1591) identificaría el punto focal con el punto de inversión de una lente convexa, al considerar que ambos coinciden con el punto en el que la imagen observada a través de la lente aparece aumentada al máximo.

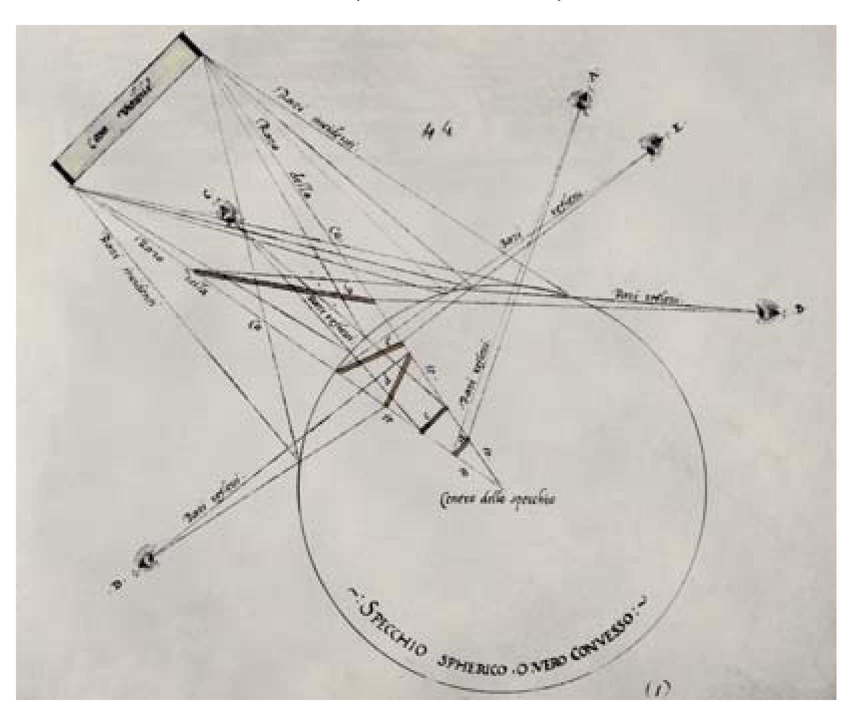
Es importante distinguir entre este saber práctico, que giraba en torno al concepto de *punctum inversionis* de espejos cóncavos y lentes convexas, y los conocimientos sobre materiales de los fabricantes de lentes de la época. Mientras que este "saber óptico práctico" cambiaría el enfoque perspectivista de la teoría óptica, fueron los conocimientos sobre materiales para la creación de lentes los que, independientemente de este saber práctico, condujeron, a principios del siglo XVII, a la invención del telescopio holandés.

## Imágenes en una *camera obscura*

La cámara oscura desempeñó una función muy importante en la óptica del siglo XVI. En primer lugar, el saber óptico práctico relacionado con la cámara oscura posibilitó que Kepler formulase una nueva teoría de la visión. La imagen proyectada en el interior de una cámara oscura era un hecho conocido empíricamente. A finales del siglo XIV, se empleaba la cámara oscura para observaciones astronómicas. Sin embargo, las imágenes proyectadas en una cámara oscura fueron conceptualmente ajenas a la óptica perspectivista, hasta que Kepler sentó las bases de la óptica geométrica moderna en la primera década del siglo XVII. Como hemos visto, el único interés de la tradición perspectivista era el problema de la percepción de imágenes; es decir, sólo se ocupaba de las imágenes percibidas por el ojo, no de las que pudieran resultar de proyecciones sobre un papel o una pared.

En los siglos XV y XVI los matemáticos llegaron en alguna ocasión a relacionar erróneamente las imágenes proyectadas empíricamente (en una cámara oscura, por ejemplo) con las imágenes generadas en un punto geométrico (no físico) del exterior de un espejo cóncavo o convexo. La determinación de ese punto resultaba de la correcta aplicación de una construcción geométrica para localizar imágenes, tal y como venía empleándose en la tradición perspectivista de la óptica. Esta falsa equivalencia llevó a algunos matemáticos a elaborar diseños ficticios de imágenes "flotantes" (es decir, no proyectadas sobre ninguna superficie), presuntamente empíricas, a las que se veía curiosamente suspendidas en el aire. Un llamativo ejemplo de esta confusión conceptual se encuentra en el manuscrito *Bellicorum Instrumentorum Liber* de Giovanni Fontana, supuesto autor de *Della Prospettiva*. Fontana diseñó una especie de "linterna mágica" que se presumía capaz de proyectar en el aire la imagen de un demonio, con el objeto de intimidar a agresores enemigos.

Fontana confundió el concepto de imagen construida geométricamente con el de imagen




**6. EN *DELLA PROSPETTIVA*, Giovanni Fontana demuestra en qué lugar del exterior de un espejo convexo se forma una imagen.**

BIBLIOTECA HENDRIK CONSCIENCE, AMBERES (*arriba*); BIBLIOTECA RICCARDIANA, FLORENCIA (*abajo*)/SuW

proyectada físicamente en una superficie. Sería mérito de Johannes Kepler aclarar esta confusión conceptual mediante la introducción del concepto de *pictura* (pintura), que se distingue de los conceptos tradicionales de la imagen (imago), que sólo hacían referencia a la imagen en cuanto algo percibido, en que nada más tiene en cuenta la imagen como resultado de la proyección de rayos de luz sobre una superficie. En su obra *Paralipomena* (1604), Kepler demostró que los rayos de luz proyectaban sobre la retina una *pictura* del objeto percibido; estableció así una nueva teoría de la visión, la cual sigue constituyendo hoy en día la base de nuestra comprensión del problema.

En la segunda mitad del siglo XVI se introducirían algunos cambios en el funcionamiento de la cámara oscura que, a la postre, resultarían en la elaboración del diseño de un instrumento telescópico de construcción completamente diferente a la del telescopio holandés. En su libro *La Pratica della Perspettiva* (1563), Daniele Barbaro describe el efecto de una lente convexa en la apertura de una cámara oscura. Aconseja la elección de las mejores lentes, y "si lo deseas, cubre la lente hasta que sólo quede destapado un pequeño círculo en el centro; cuando esta parte quede sin cubrir, verás un efecto aún más vivo". Barbaro describía así el uso de un diafragma. Como veremos después, esta apertura anular sería un elemento importante en la construcción de los primeros telescopios.

En su traducción al italiano de la obra de Euclides, *La Prospettiva* (1573), el matemático Egnazio Danti muestra cómo puede volver a invertirse la imagen en una cámara oscura con ayuda de un espejo plano. En este aspecto el más diligente sería sin embargo Della Porta, quien en la edición de 1589 de su *Magia Naturalis* llegó a describir varias posibles combinaciones de espejos y lentes. Una de las cámaras oscuras de Della Porta consistía en la combinación de una lente convexa (en la apertura) y un espejo cóncavo. Hubo algo que Della Porta no advirtió: su cámara oscura era en realidad un telescopio. El matemático inglés William Bourne propondría en el año 1580 usar exactamente ese mismo diseño para la construcción de un telescopio. Su propuesta se basaba en el saber óptico práctico sobre el *punctum inversionis* de lentes convexas y espejos cóncavos.

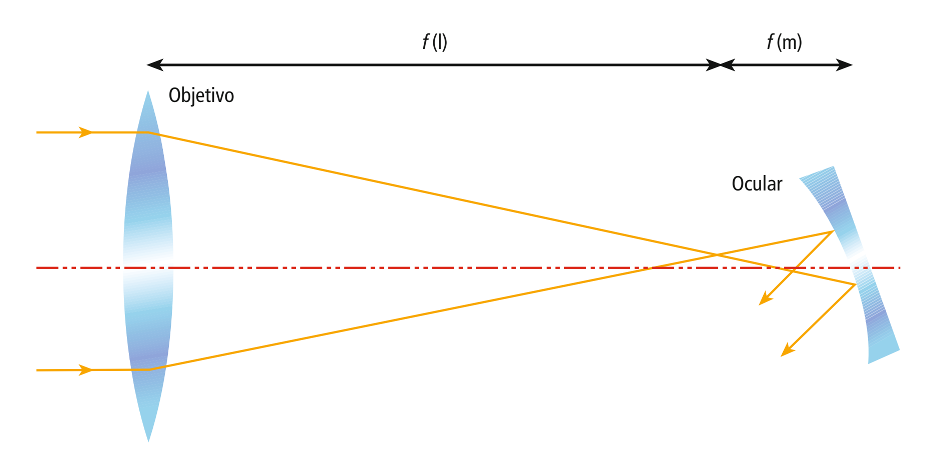
## El saber óptico práctico y el invento de William Bourne

En el año 1571, otro matemático inglés, Thomas Digges, había atribuido a su padre el invento del telescopio. En su edición de la *Pantometria* de su padre, Leonard Digges, escribía Thomas que "en sus incesantes y penosas prácticas, acompañadas de demostraciones matemáticas, [mi padre] no sólo era capaz, de la mejor manera y en diversas ocasiones, de descubrir con lentes proporcionales objetos remotos, leer misivas y contar monedas, sino también de discernir lo que acontecía en lugares privados a siete millas de distancia".

Si bien puede ser que Digges hubiese llegado a diseñar algún tipo de instrumento telescópico, la ausencia de detalles del texto reproducido arriba no permite distinguirlo de otros relatos legendarios de la época referentes a instrumentos telescópicos. No obstante, unos diez años más tarde, Bourne aparecería con una descripción incomparablemente más precisa de un instrumento telescópico; difería probablemente del instrumento que Digges atribuía a su padre.

En una carta fechada en torno a 1579/80 y dirigida a Lord Burghley, secretario de estado y jefe del Tesoro de la reina Isabel I, Bourne proponía un telescopio que constaba de la misma combinación de una lente convexa y un espejo cóncavo que la cámara oscura de Della Porta. En el diseño de Bourne la luz pasaba primeramente a través de la lente para ser reflejada a continuación por el espejo. El observador había de mirar la imagen en el espejo, quedando la lente a su espalda. El espejo debía estar ligeramente inclinado con respecto a la lente, para que la cabeza del observador no apantallase la luz proveniente de la lente (*véase la figura 7*).

Bourne argumentaba que la lente y el espejo debían estar lo suficientemente alejados el uno del otro como para que "cada cristal genere el mayor haz que pueda". Tiene interés que Bourne, en su descripción de las propiedades de la lente y el espejo, emplease conceptos tales como "haz focal" y "haz de perspectiva". El haz focal determinaba el foco, mientras que el de perspectiva marcaba el lugar donde una imagen, en su mayor ampliación, llenaba toda la superficie de la lente.




**7. EL MATEMATICO INGLES WILLIAM BOURNE describe, en una carta a Lord Burghley fechada en torno a 1579/80, un telescopio compuesto por una lente convexa (en el objetivo) y un espejo cóncavo (en el ocular). En la ilustración moderna reproducida aquí *f*(*l*) denota la distancia focal de la lente convexa y *f*(*m*) la distancia focal del espejo cóncavo.**

STERNE UND WELTRAUM

### El autor

**Sven Dupré** investiga la historia de la óptica y los comienzos prácticos de la ciencia moderna. Es miembro de la Fundación Flamenca para la Investigación Científica (FWO) y uno de los creadores del Centro para la Historia de la Ciencia de la Universidad de Gante.

Dicho lugar se encontraba cercano al punto focal, como Bourne explicaba a su potencial mecenas. De ese modo, Bourne describía las propiedades de la lente convexa y del espejo cóncavo haciendo uso de nociones que combinaban las propiedades focales y de formación de imágenes de aquélla y de éste. Con otras palabras, su descripción empleaba términos que nosotros asociaríamos con el punto de inversión de Ausonio y Della Porta, y esto teniendo en cuenta que Bourne apenas si se hallaba familiarizado con la teoría óptica de la tradición perspectivista.

El concepto de aumento óptico de Bourne es muy significativo por su dependencia del saber óptico práctico. En su carta a Lord Burghley, Bourne sugería que la lente convexa debía ser "de gran tamaño, de una anchura de aproximadamente un pie, o de 14 a 16 pulgadas", es decir, de entre 30 y 40 centímetros. ¿Por qué insistía Bourne en una lente tan grande, cuando lentes más pequeñas pueden generar el mismo aumento? Basándose en su saber óptico práctico, a Bourne le parecía claro que la imagen aumentada había de ocupar toda la superficie de la lente cuando el ojo se encontraba en el punto focal o punto de inversión. Expresado en una terminología más familiar, cuando el ojo se encuentra cerca del foco de una lente convexa, la imagen se observa aumentada al máximo, pero borrosa. Muy cerca del punto focal la imagen "explota", de modo que parece ser tan grande como el diámetro de la lente. Era por tanto absolutamente razonable suponer que el aumento de la imagen no dependía de la distancia focal, sino del tamaño de la lente. La recomendación de Bourne a la hora de escoger el diámetro de la lente era, por tanto, "cuanto mayor, mejor".

Muy pesar de Bourne, fue la insistencia en este concepto de aumento, que requería un gran tamaño de la lente, una de las razones que hicieron que su invento acabara por no llevarse a cabo. Para los fabricantes de lentes de aquella época resultaba sumamente difícil elaborar lentes de un diámetro tan grande. Del proyecto de Bourne no volvió a oírse hablar. Un fracaso como éste hace explícito que, en lo que se refiere a la construcción de telescopios, la artesanía en la fabricación de lentes desempeñaba un papel decisivo.

Durante el reinado de Isabel I, reina de Inglaterra e Irlanda de 1558 a 1603, Inglaterra importaba de Alemania, Flandes y Normandía un gran número de lentes cuyo diámetro medía unos tres centímetros. El tamaño requerido por Bourne no formaba parte de la gama estándar de la que era posible disponer en el mercado inglés. Sin embargo, el problema que suponía el extraordinario diámetro de lente que Bourne les requería a los artesanos no era algo privativo de la Inglaterra isabelina. Si Bourne hubiera planteado su proyecto en Middelburg, hubiera tropezado con la misma dificultad. Middelburg era, tras Amsterdam, la principal ciudad comercial y cultural de la República de Holanda, así como un importante centro de fabricación de vidrios.

En aquella época, la calidad óptica necesaria para la construcción de telescopios solamente podía conseguirse reduciendo las lentes a un pequeño diámetro. Aún hoy, la huella de este procedimiento puede reconocerse en los bordes desiguales de las lentes de los telescopios de principios del siglo XVII bien conservados (*véase la figura 8*).

La solución del problema implicaba restringirse a pequeños diámetros y aperturas, pero el concepto de aumento que tenía Bourne apuntaba justamente en dirección contraria: su invención no llegó a fraguarse debido a que el saber práctico de aquel entonces no pudo materializarse en una prescripción realizable con las técnicas de fabricación de lentes de la época.

Por el contrario, el telescopio holandés de Middelburg se propagaría como un reguero de pólvora hasta el último rincón de Europa: su éxito y su rápida expansión se deberían a que las dos lentes necesarias para su construcción podían encontrarse en cualquier establecimiento de fabricación de gafas.

La carta de Bourne a Burghley nos deja constancia de la existencia de un saber óptico práctico innovador, que difería del saber óptico tradicional. Pero este saber óptico práctico llevó a Bourne en una dirección totalmente opuesta a la del éxito. Los conocimientos sobre materiales que la industria del vidrio y los talleres de fabricación de lentes habían acumulado ya en los siglos anteriores a la solicitud de patente de Lipperhey serían un recurso fundamental en la fabricación de telescopios.



**8. LOS BORDES IRREGULARES DE LAS LENTES de los telescopios de principios del siglo XVII muestran que se redujo su diámetro. Se aprecia en la lente del objetivo de uno de los dos telescopios de Galileo conservados en el Instituto y Museo de la Historia de la Ciencia en Florencia. La imagen muestra, asimismo, el diafragma correspondiente.**

INSTITUTO Y MUSEO DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA, FLORENCIA/*SuW*

## El arte de la fabricación de lentes

Las gafas convexas para la corrección de la vista cansada fueron inventadas en Italia en torno al año 1285. Existían gafas de este estilo de muy distintos tipos, para diferentes edades comprendidas entre los 30 y los 70 años. Desde mediados del siglo XV también era común el uso de lentes cóncavas para la corrección de la miopía, que tenían probablemente una menor demanda y por ello sólo las había de dos clases. Florencia constituía, en el siglo XV, uno de los principales centros de fabricación de gafas: entre principios del siglo XV y mediados del XVI constan en los archivos 52 fabricantes de gafas, entre ellos cuatro monjes. Sus establecimientos se encontraban en los barrios de San Giovanni y Santa Croce. A mediados del siglo XVI surgieron más centros de fabricación de gafas; por ejemplo, Venecia, cuna de la próspera industria del vidrio.

No obstante, en el siglo XV Florencia tuvo que competir con Núremberg y Ratisbona; las gafas fabricadas en esas ciudades circulaban por toda Europa. Las gafas ya no eran ningún bien de lujo exclusivo de los ricos, sino objetos asequibles para cualquiera en la mayor parte de Europa.

Hacia finales del siglo XIII los artesanos venecianos desarrollaron un nuevo tipo de vidrio. Era más claro, de un color más tenue y con menos burbujas que el típico *Waldglas* (o "cristal de bosque", "vidrio de helechos" o "vidrio de potasa"), un vidrio verdoso que se empleaba especialmente en la fabricación de pequeños cristales circulares abombados para las ventanas. El nuevo vidrio veneciano se hizo famoso bajo el nombre de *cristallo,* pues recordaba al cristal de roca.

En Venecia el *cristallo* se empleaba en artículos de lujo, como los célebres espejos venecianos. Cuando los artesanos vidrieros emigraron desde Italia a diferentes lugares de Europa y establecieron en ellos nuevos talleres, se hicieron populares los nuevos productos de cristal de lujo de estilo veneciano. Antonio Neri visitó la industria de vidrio italiana en Amberes, e inmediatamente después publicó en Florencia *L'Arte Vetraria* (1612), el primer manual sobre fabricación de vidrio. De todos modos, los manuales de este tipo, incluido el de Neri, no decían nada sobre la fabricación de vidrios para espejos, ni de lentes para gafas. La situación cambiaría con la publicación del *Telescopium* de Girolamo Sirtoris (1618).

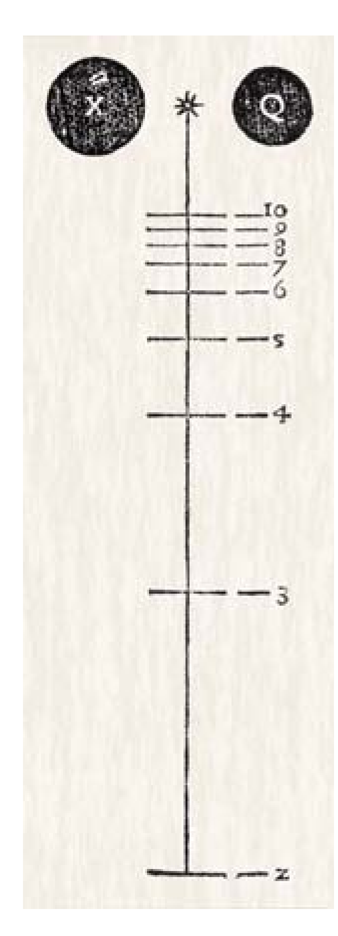
Estudios recientes sobre las lentes entre los siglos XIV y XVI han mostrado cómo pudieron mejorarse los procedimientos de fabricación de lentes. También explican por qué la invención del telescopio no se hizo posible hasta el final de esa época. Primeramente, para la fabricación de gafas era necesario cortar láminas en esferas de vidrio soplado. A continuación, se debía tallar uno de los lados de tales láminas de curvatura esférica para convertirlo en una superficie plana: la superficie interna cóncava (para una lente que corrigiese la vista cansada) o la superficie externa convexa (para la corrección de la miopía).

Hacia finales del siglo XV los fabricantes de gafas de Núremberg desarrollaron otra técnica: cortaban láminas a partir de discos de vidrio planos. Un lado se dejaba plano, mientras que al otro se le daba forma bien cóncava, bien convexa. La novedosa técnica permitía a los artesanos mejorar la esfericidad de la superficie cóncava o de la convexa.

Con respecto a la técnica de fabricación de lentes, el punto decisivo para la invención del telescopio holandés no fue la disponibilidad de lentes cóncavas o convexas, con sus diferentes graduaciones, cuya combinación posibilitase el aumento telescópico. El factor decisivo fue la mejora en la calidad de las lentes, posible desde finales del siglo XV gracias a una nueva técnica de fabricación.




**9. ESTE DETALLE de *La Virgen del canónigo Van der Paele*, de Jan van Eyck (1436), muestra a aquél con sus gafas de lectura.**




**10. BENITO DAZA DE VALDES DESCRIBE** en su obra *Uso de los antojos para todo genero de vistas* (España, 1623), con esta imagen, un procedimiento para medir la curvatura de las lentes. Probablemente ya fuese conocido hacia finales del siglo XVI por los fabricantes de gafas italianos.

En principio, este progreso técnico habría hecho posible la invención del telescopio holandés a partir del año 1500 más o menos, especialmente de la mano de los fabricantes de gafas, que ya consideraban la idea de conseguir, mediante una combinación apropiada de lentes, una resolución que superase a la del ojo desnudo. Su saber práctico sobre lentes cóncavas y convexas les hubiera permitido averiguar fácilmente que una correcta disposición de ambos tipos de lentes proporcionaba una imagen aumentada. Conocían con exactitud a qué distancia de una lente convexa se observa una imagen aumentada (y distorsionada) al máximo; y sabían, por otro lado, que una lente cóncava hace posible una "visión más nítida". La combinación de un objetivo convexo con un ocular cóncavo es la más natural, dado que un ocular cóncavo ofrece al observador una visión nítida sobre la lente convexa, con independencia de la distancia mutua entre ambas lentes. Menos evidente resulta la combinación de dos lentes convexas necesaria para el telescopio astronómico o kepleriano.

Si bien es cierto que la aparición de una nueva técnica hacía posible la fabricación de lentes de mejor calidad, no por ello las del siglo XVI superaban en calidad a las de las centurias precedentes. Las lentes eran muy asequibles en los grandes centros de comercio, donde la lectura y la escritura habían cobrado importancia entre el pueblo. Como consecuencia de una demanda creciente, las lentes comenzaron a fabricarse en masa, lo que afectó a su calidad. Un análisis detallado de gran cantidad de lentes de la época ha demostrado que ni siquiera el diez por ciento de las mismas alcanzaba la calidad necesaria para la construcción de un telescopio, pues no basta con ofrecer una imagen aumentada al observador, sino que hace falta al mismo tiempo una resolución alta en comparación con la del ojo desnudo.

No debe por tanto sorprendernos que fuese un fabricante de gafas el primero en presentar una patente para un telescopio. En los establecimientos abundaban lentes de diversa calidad, entre las cuales el fabricante de gafas (o el constructor de un telescopio) podía escoger las mejores. Las lentes para telescopios no se hacían de encargo, sino que se escogían entre la amplia oferta disponible. Así aconteció en el caso del telescopio de Galileo.

## El camino del telescopio holandés desde Middelburg hasta Galileo

Inmediatamente después de la solicitud de patente de Lipperhey en 1608, tanto el telescopio holandés como las noticias relacionadas con el mismo se difundieron por toda Europa. A ello ayudó el hecho de que, justo cuando Lipperhey llegaba a La Haya para presentar su invento al príncipe Mauricio, se estaba celebrando allí la conferencia de paz más importante en medio siglo. Mauricio mostró el invento a Ambrosio Spinola, comandante de las tropas españolas en los Países Bajos, quien inmediatamente se percató de las ventajas militares de este instrumento. Spinola volvió con un telescopio a Bruselas, donde lo enseñó al archiduque Alberto de Austria (esposo de Isabel Clara Eugenia, hija del rey Felipe II). El archiduque se encontraba en marzo de 1609 en posesión de un telescopio. Gracias al servicio de Guido Bentivoglio, nuncio papal en Bruselas, el mismo instrumento fue enviado a Roma, donde no tardó en llegar a manos de los matemáticos jesuitas del Colegio Romano.

El telescopio holandés se expandió rápidamente también por otros países. Pierre Jeannin, cabeza de la delegación francesa en La Haya, encargó a Lipperhey dos instrumentos para el rey de Francia. En noviembre de 1608 las noticias sobre el telescopio de Lipperhey habían llegado a París. En otoño, en la Feria del Libro de Frankfurt, un holandés ponía a la venta un instrumento tal, y desde abril de 1609 un fabricante de gafas de la ciudad vendía telescopios. El mismo soldado que probablemente se hizo cargo de que la carta de Jeannin llegase al rey de Francia viajó en mayo de 1609 a Milán, donde vendió el instrumento a un comandante español del lugar. En esta época, pues, el telescopio pasó por diversos canales diplomáticos.

De octubre de 1608 es un informe que tenía por título: "Ambassades du Roy de Siam envoyé à l'Excellence du Prince Maurice, arrivé à La Haye le 10 Septemb(re) 1608" ("Embajadas del rey de Siam a Su Excelencia el Príncipe Mauricio, llegadas a La Haya el 10 de septiembre de 1608"). El mismo contenía un parte sobre una misión diplomática de Siam (actual Tailandia) en los Países Bajos; no obstante, una parte del mismo se dedicaba a la presentación del telescopio de Lipperhey ante el príncipe Mauricio en La Haya.

Paolo Sarpi, teólogo veneciano y en aquel entonces amigo muy cercano de Galileo, leyó dicho parte, según su propio testimonio, en noviembre de 1608. Pero sólo tras la llegada a Padua de "un extranjero" en julio de 1609 (probablemente el mismo francés que en mayo había llegado a Milán con un telescopio) se apresuraron Sarpi y Galileo a hacer algo. ¿Por qué dejó Galileo pasar tanto tiempo?

Eileen Reeves sugiere que Galileo tenía todos los motivos para pensar que las supuestas nuevas noticias estuvieran en realidad

BIBLIOTECA BRITANICA/*SuW*

anticuadas. El diseño óptico del telescopio holandés era manifiesto para cualquier experto que tuviese la oportunidad de verlo. No lo apreciaban así Galileo y su círculo, cuyas informaciones al respecto, incluso meses después de haber oído hablar del invento, se basaban únicamente en rumores. Sin conocimiento de los detalles técnicos, Galileo no podía distinguir entre las noticias del momento provenientes de Holanda e historias como la del faro de Alejandría.

No obstante, una vez incitado a ello, Galileo se movió con rapidez. En agosto de 1609, es decir, menos de once meses después de la demostración de Lipperhey en La Haya, Galileo ya fue capaz de presentar un instrumento mejorado. Los telescopios holandeses disponibles en el mercado tenían tres o cuatro aumentos, mientras que el primer telescopio de Galileo ofrecía nueve. ¿Cómo consiguió Galileo una mejora tan notable?

Aunque Galileo estaba poco al tanto de las dificultades de la óptica perspectivista, se hallaba muy familiarizado con la óptica práctica, gracias a la lectura y copia de la obra de Ausonio, por ejemplo. Como en el caso de Bourne, tal conocimiento podía haber inducido a Galileo a pensar que una capacidad de aumento mayor podía conseguirse mediante el uso de lentes de mayor tamaño, en vez de basarse en una mayor distancia focal. Pero Galileo encontró otra vía: se apoyó en su experiencia con un método usado por los fabricantes de gafas para medir la curvatura de las lentes convexas. Lo describiría más tarde en su *Sidereus Nuncius* (1610) como procedimiento para medir los aumentos de un telescopio.

Para medir la curvatura de las lentes, se dibujaban sobre una hoja de papel dos círculos de diferente diámetro. Entre ambos círculos se trazaba una escala. A continuación se desplazaba una lente sobre esa escala hasta que el círculo de menor tamaño, según se observaba a través de la lente, tuviera el mismo tamaño que el círculo mayor, cuando éste se observaba con el ojo desnudo (*véase la figura 10*). Este método implicaba una relación entre la curvatura de la lente y su capacidad de aumento; sería el método que Galileo usaría para conseguir un aumento mayor en su telescopio.

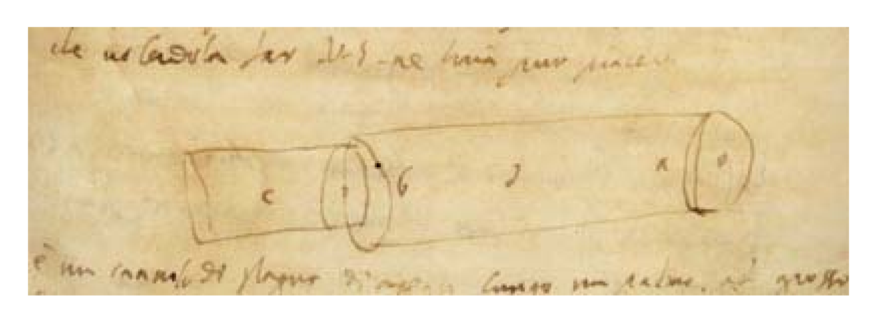
Otro factor importante en lo referente a la calidad del telescopio de Galileo concierne al empleo de diafragmas sobre la lente del objetivo. Dado que un diafragma hace más pequeña la apertura del telescopio, contribuye a atenuar los efectos negativos de la aberración esférica y de la aberración cromática sobre la calidad de la imagen. El diafragma no era, sin embargo, un invento de Galileo: Daniele Barbaro ya lo mencionaba en 1567 al referirse a la cámara oscura. Por otro lado, Giovanni Battista Della Porta había visto un telescopio en Nápoles en agosto de 1609. En el boceto del mismo que Della Porta realizó para Federico Cesi (*véase la figura 11*) puede reconocerse claramente el diafragma. En esa época había más telescopios provistos también de diafragmas.

Galileo había experimentado con diafragmas antes de que el telescopio llegase a sus manos. Años después de sus descubrimientos astronómicos de 1609, siguió estudiando las propiedades de los diafragmas. Terminó por dominar su modo de empleo y el concepto de "irradiación", que desempeñaba, a su entender, una función fundamental.

El concepto de irradiación se basaba en los experimentos y observaciones de los efectos ópticos en espejos, lentes y telescopios. Llama la atención que, para explicar el funcionamiento de un diafragma, Galileo no utilizase el concepto de aberración esférica, que procede de la teoría óptica. El telescopio de Galileo no es el resultado de un conocimiento teórico de la óptica, con el que Galileo estaba poco familiarizado. En realidad, se basa en un saber óptico práctico y en el conocimiento sobre materiales procedente de la fabricación de vidrios, espejos y gafas.

El fracaso del invento de Bourne demuestra, precisamente, que el saber óptico práctico no bastaba por sí solo para llegar al telescopio: para ello, se requería la aportación adicional de los conocimientos sobre los materiales necesarios para la fabricación de lentes. Galileo aprendió de los artesanos venecianos el oficio del pulido de lentes para la fabricación del telescopio y, asimismo, cómo cabía entender el concepto de aumento óptico de suerte que le permitiera mejorar el instrumento. El telescopio de Galileo es, por tanto, el resultado innovador de una combinación de saber práctico y conocimientos materiales de la óptica.

El 21 de agosto de 1609, Galileo Galilei subía la torre de San Marcos para presentar ante algunos nobles de la Señoría de Venecia el empleo y las ventajas militares de su telescopio mejorado: eran los primeros pasos en su camino hacia la fama.



**11. EN UNA CARTA FECHADA el 28 de agosto de 1609 y dirigida al príncipe Federico Cesi, uno de los fundadores de la Accademia dei Lincei, el sabio Giovanni Battista Della Porta reproducía el dibujo de un telescopio que había visto en Nápoles. El signo que aparece en el extremo derecho no es una letra como el resto (a, b, c, d), sino la pequeña apertura del telescopio.**

BIBLIOTECA DE LA ACCADEMIA DEI LINCEI, ROMA/*SuW*

## Bibliografía complementaria


AUSONIO'S MIRROR AND GALILEO'S LENSES: THE TELESCOPE AND SIXTEENTH-CENTURY PRACTICAL OPTICAL KNOWLEDGE. S. Dupré en *Galileana, Journal of Galilean Studies*, vol. 2, págs. 145-180; 2005.

RENAISSANCE VISION FROM SPECTACLES TO TELESCOPES. V. Ilardi. The American Philosophical Society, 2007.

DER LANGE WEG ZUR ERFINDUNG DES FERNROHRS. R. Willach en *Der Meister und die Fernrohre*, dirigido por J. Hamel e I. Keil, págs. 34-126. Harri Deutsch; Frankfurt am Main, 2007.

GALILEO'S GLASSWORKS: THE TELESCOPE AND THE MIRROR. E. Reeves. Harvard University Press; Cambridge (Mass.) y Londres, 2008.

THE INVENTION OF THE TELESCOPE. A. Van Helden. The American Philosophical Society; Philadelphia, 2008.

THE ORIGINS OF THE TELESCOPE. Dirigido por S. Dupré, A. Van Helden y H. Zuidervaart. KNAW Press; Amsterdam, 2009.

# Lateralización del cerebro

**La división del trabajo entre los dos hemisferios cerebrales, considerada antaño un rasgo exclusivo de los humanos, se remonta a unos 500 millones de años. El origen del habla, del uso preferente de la mano derecha, del reconocimiento facial y de la percepción espacial se encuentra en la asimetría cerebral de los primeros vertebrados**

Peter F. MacNeilage, Lesley J. Rogers y Giorgio Vallortigara

### CONCEPTOS BASICOS

- Los autores proponen que la especialización de los dos hemisferios cerebrales ya existía cuando aparecieron los vertebrados, hace 500 millones de años.
- Parece que el hemisferio izquierdo se centró en un principio en el control de los modelos de conducta rutinarios; el hemisferio derecho se especializó en la respuesta a situaciones inesperadas.
- El habla y la preferencia por la mano derecha debieron desarrollarse a partir de la especialización del control de la conducta rutinaria.
- El reconocimiento facial y la percepción espacial posiblemente tengan su origen en la necesidad de un mecanismo de detección de depredadores.

El hemisferio izquierdo del cerebro humano controla el lenguaje, sin lugar a dudas nuestro atributo mental más destacable. Regula también el uso preferente de la mano derecha. El hemisferio derecho ejerce control sobre el modo en que percibimos la interrelación de las cosas en el espacio. Hace 40 años se pensaba que esta lateralización cerebral (del lenguaje, la preferencia manual y la percepción espacial) existía sólo en los humanos y que el resto de los animales no presentaban ningún tipo de especialización hemisférica.

Esas creencias coinciden con la idea de que los humanos han alcanzado un estadio especial de evolución. Biólogos y expertos en comportamiento solían estar de acuerdo en que el uso preferencial de la mano derecha se desarrolló en nuestros antepasados homínidos cuando aprendieron a construir y a utilizar herramientas, hace unos 2,5 millones de años. Se pensaba también que esta lateralidad permitió la aparición del habla. Quizá, con el tiempo, el hemisferio izquierdo añadiera a su repertorio de acciones manuales especializadas un lenguaje de signos, que luego se convertiría en habla. O tal vez, la capacidad del hemisferio izquierdo para dirigir la actividad manual se ampliara hasta controlar el aparato vocal en el habla.

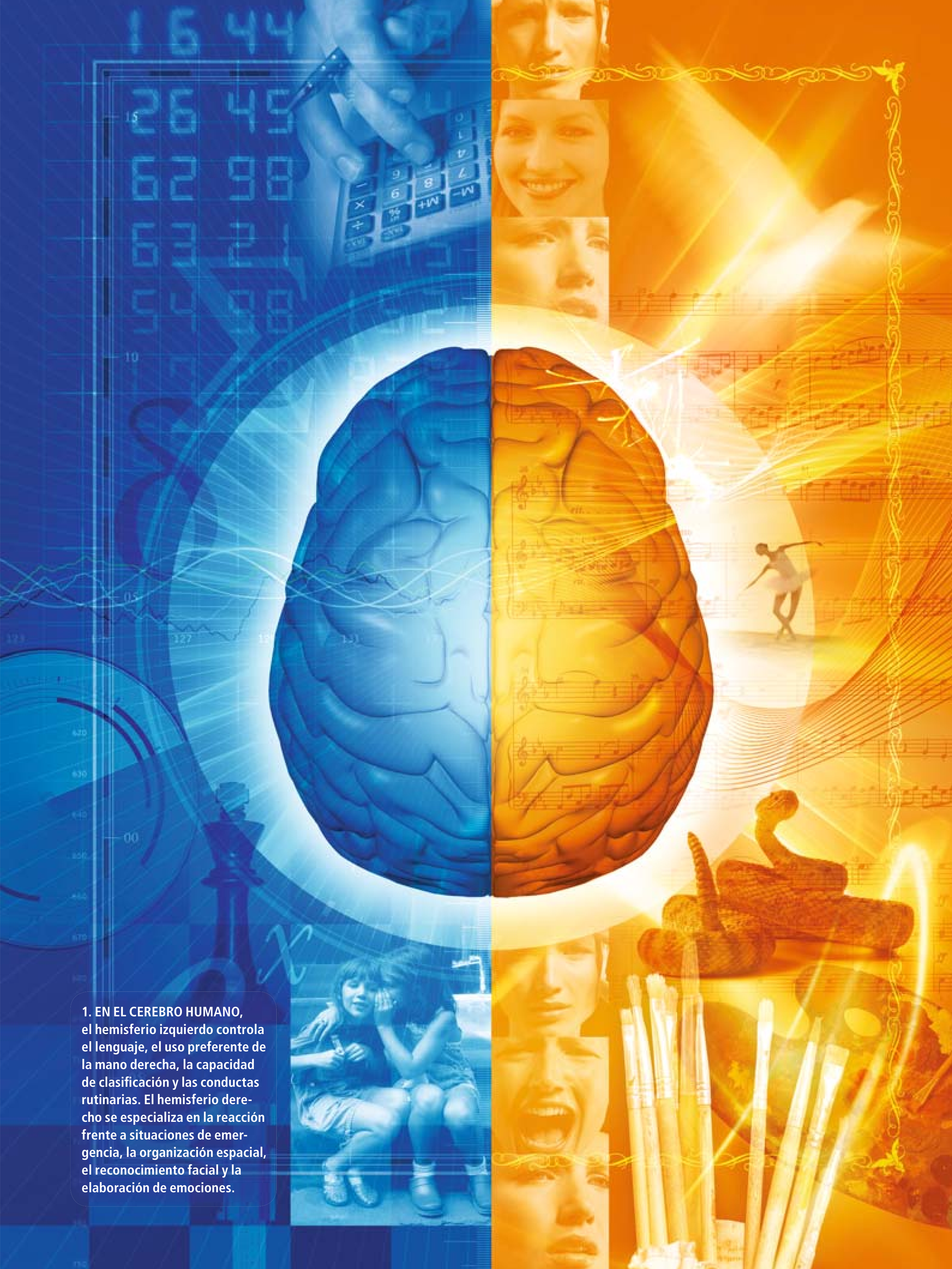
En ambos casos, el habla y el lenguaje habrían evolucionado a partir de una habilidad manual reciente para construir herramientas. Después de que el hemisferio izquierdo se especializara en el uso de las manos, el hemisferio derecho se habría convertido, por defecto, en el centro de la percepción espacial.

Sin embargo, la investigación acometida sobre otros animales durante los últimos decenios ha demostrado que sus dos hemisferios cerebrales ejercen también funciones diferenciadas. A pesar de esos hallazgos, la opinión predominante sigue defendiendo que los humanos son distintos. Muchos investigadores piensan todavía que las especializaciones descubiertas en los hemisferios de otros animales no guardan relación con la especialización humana; creen que el inicio de estas últimas coincidió con la aparición de los humanos.

En este artículo presentamos datos sobre una hipótesis totalmente distinta que está ganando cada vez más apoyo, sobre todo entre los biólogos. Sostenemos que la especialización de cada hemisferio del cerebro humano existía ya en su forma básica cuando surgieron los vertebrados, hace unos 500 millones de años. Las especializaciones hemisféricas más recientes, incluidas las humanas, habrían evolucionado a partir de las iniciales mediante el proceso darwinista de la descendencia con modificación. (En ese mecanismo, las capacidades relacionadas con los rasgos antiguos se cambian o se adaptan para servir a otros rasgos en desarrollo.) Nuestra hipótesis plantea que el hemisferio cerebral izquierdo de los vertebrados se habría especializado, al principio, en el control de modelos de conducta arraigados bajo circunstancias ordinarias y familiares. El hemisferio derecho, sede primaria de las emociones, se habría centrado en la detección y respuesta ante estímulos inesperados del entorno.

En los primeros vertebrados, tal división del trabajo empezó cuando uno u otro hemisferio tendió a responsabilizarse de situaciones determinadas. A partir de entonces, el he-

FOTOILUSTRACION DE TWIST CREATIVE; MEDICALRF.COM *Corbis* (*cerebro*); MEDIOIMAGES *Getty Images* (*calculadora*); JOERG STEFFENS *Corbis* (*rostros*); WESTEND61 *Corbis* (*mujer sonriente*); DOUGAL WATERS *Getty Images* (*bailarina*); MIKE KEMP *Getty Images* (*serpiente de cascabel*); C SQUARED STUDIOS *Getty Images* (*paleta*); VLADIMIR GODNIK *Getty Images* (*pinceles*); CARRIE BORETZ *Corbis* (*niñas susurrando*); ROBERT LLEWELLYN *Corbis* (*calibrador*)



1. EN EL CEREBRO HUMANO, el hemisferio izquierdo controla el lenguaje, el uso preferente de la mano derecha, la capacidad de clasificación y las conductas rutinarias. El hemisferio derecho se especializa en la reacción frente a situaciones de emergencia, la organización espacial, el reconocimiento facial y la elaboración de emociones.

misferio derecho adquirió el control principal del comportamiento en circunstancias potencialmente peligrosas que exigían una reacción rápida (detección de un depredador en las proximidades). En los otros casos, el control pasaba al hemisferio izquierdo.

El hemisferio izquierdo se convirtió, pues, en sede de la conducta automotivada, o de control de arriba abajo. (Cabe remarcar que ese tipo de comportamiento automotivado no es necesariamente innato; muchas veces se aprende.)

El hemisferio derecho, en cambio, se transformó en sede de la conducta motivada por el entorno, o de control de abajo arriba.

El proceso que dirige las conductas más especializadas (lenguaje, construcción de herramientas, dirección y orientación en el espacio, reconocimiento facial, etcétera) evolucionó a partir de esos dos sistemas básicos de control.

## El hemisferio izquierdo

El grueso de las pruebas que respaldan nuestra hipótesis no proceden del estudio directo del cerebro, sino de observaciones sobre las conductas que favorecen el uso de uno u otro lado del cuerpo. En el sistema nervioso de los vertebrados, las conexiones entre el cuerpo y el cerebro están cruzadas: los nervios de un lado del cuerpo se hallan unidos con el hemisferio del cerebro del lado opuesto.

Desde hace algún tiempo, se han venido acopiando pruebas que apoyan la primera parte de nuestra hipótesis: el hemisferio izquierdo de los vertebrados se especializa en el control de las conductas rutinarias autodirigidas. Una de las conductas rutinarias con un sesgo hacia la derecha observada en numerosos vertebrados es la alimentación. Peces, reptiles y sapos tienden a atacar a la presa por su lado derecho, guiados por el ojo derecho y el hemisferio izquierdo. En varias especies de aves (gallinas, palomas, codornices y cigüeñuelas) el ojo derecho es el guía principal en distintos tipos de picoteo de alimentos y captura de presas. En un caso, esta lateralidad en la alimentación parece que ha dado lugar a una asimetría en la anatomía externa del animal: el pico del chorlitejo piquituerto de Nueva Zelanda está torcido hacia la derecha; de ese modo, el ojo derecho del ave puede guiar el pico cuando busca alimento bajo los guijarros del río.

En cuanto a los mamíferos, el rorcual ofrece un ejemplo espectacular de lateralidad en los hábitos alimentarios. Phillip J. Clapham, actualmente en el Centro de Ciencia Pesquera de Alaska en Seattle, y sus colaboradores descubrieron que 60 de 75 ballenas presentaban excoriaciones sólo en la mandíbula derecha; las 15 ballenas restantes tenían excoriaciones sólo en la mandíbula izquierda. Los resultados demostraban que cada ballena prefería un lado de la mandíbula para capturar los alimentos, siendo el derecho el favorito.



**2. EN LOS HUMANOS y otros vertebrados, los nervios de un lado del cuerpo se hallan unidos al hemisferio del cerebro del lado opuesto. Como consecuencia, cada hemisferio controla el lado opuesto del cuerpo.**

ANDREW SWIFT

En resumen, en todas las clases de vertebrados (peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos) suele mantenerse lo que probablemente fue una propensión ancestral a emplear el lado derecho durante la actividad rutinaria de alimentarse.

## Mejor con la derecha

¿Qué relación guardan esos hallazgos con el uso preferencial de la mano derecha, que se suponía privativo del género humano? Las pruebas sobre la preferencia del lado derecho en las aves y las ballenas resultan fascinantes, pero apenas permiten rebatir la antigua creencia de que la cualidad de diestro en los humanos no tuvo precursores evolutivos. No obstante, se ha producido más de una docena de estudios donde queda demostrada la preferencia de la mano derecha en otros primates, nuestros parientes evolutivos más próximos, indicio de que la cualidad de diestro en los humanos descendió de esos primates iniciales. La preferencia por la mano derecha se observa en los simios inferiores (babuinos, capuchinos y macacos rhesus) y superiores (chimpancés).

Muchos de los estudios sobre simios superiores han sido realizados por William D. Hopkins, del Centro Nacional Yerkes de Investigación en Primates, en Atlanta, y sus colaboradores. El grupo de Hopkins ha observado la preferencia de la mano derecha, sobre todo, en tareas que implicaban la coordinación de ambas manos o el alcance de un alimento cuya altura exigía ponerse de pie. Los investigadores colocaron miel dentro de un tubo corto de plástico que se ofreció a uno de los simios. Para obtener el apreciado alimento, el simio debía sostener el tubo con una mano y extraer la miel raspándola con un dedo de la otra mano. En una proporción de 2 a 1, los simios preferían extraer la miel con un dedo de la mano derecha. De modo similar, en los experimentos para alcanzar alimentos, los simios solían atrapar con la mano derecha la comida deseada.

Esas observaciones sugieren también que, a medida que los primates iniciales evolucionaron y realizaron tareas más difíciles y más elaboradas para conseguir alimento, su preferencia por una mano se hizo más palmaria. Al ir aumentando la complejidad de las tareas, se haría apremiante que las señales de control del cerebro se transmitieran lo más directamente posible a la mano más experta. Ya que la ruta más directa desde el hemisferio

izquierdo (el hemisferio especializado en tareas rutinarias) hasta el cuerpo sigue el recorrido de los nervios periféricos que cruzan el cuerpo, la mano derecha se convirtió de forma progresiva en la opción preferida entre los primates no humanos para abordar tareas elaboradas, aunque rutinarias.

## Comunicación y hemisferio izquierdo

Que la cualidad de diestro en los humanos evolucionara a partir de la modificación de los antiguos hábitos de alimentación de los primates superiores ancestrales resulta verosímil. Pero, ¿dieron también los hábitos alimentarios lugar a la especialización del hemisferio izquierdo en el lenguaje? Con ello no pretendemos declarar que ese desarrollo fuera directo. Proponemos que el "hemisferio del lenguaje" se habría formado a partir de una especialización intermedia y algo menos primitiva del hemisferio izquierdo: en concreto, su especialización en la comunicación rutinaria, vocal y no vocal. Ahora bien, contrariamente a los postulados tradicionales de la paleontología, ninguna de esas capacidades comunicativas apareció con el origen de los humanos; descienden también de especializaciones del hemisferio advenidas en animales que vivieron mucho antes que emergiera la especie humana.

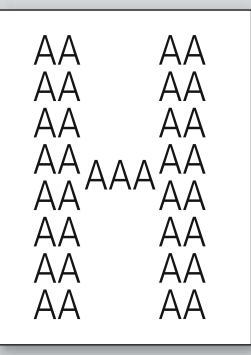
En las aves, se ha demostrado que el hemisferio izquierdo controla el canto. En los leones marinos, perros y simios, el hemisferio izquierdo controla la percepción de las llamadas de otros miembros de su especie. Uno de los autores (Rogers), en colaboración con Michelle A. Hook-Costigan, ahora en la Universidad de Texas A&M, observó que los titíes comunes abrían el lado derecho de su boca con mayor amplitud que el izquierdo cuando llamaban de forma amistosa a otros titíes. Las personas solemos abrir más el lado derecho de la boca cuando hablamos, como resultado de la mayor activación del lado derecho del rostro por el hemisferio izquierdo.

Sin embargo, hay pocas cosas en la naturaleza que se prediquen universalmente. En ciertos animales, la respuesta vocal ante situaciones con carga emocional se ha vinculado con el hemisferio izquierdo, no con el derecho (que es lo que correspondería). Cuando un macho de rana es agarrado por atrás por un macho rival, las respuestas vocales del primero parecen estar controladas por el hemisferio izquierdo. El hemisferio izquierdo controla en los ratones la recepción de las llamadas de inquietud de sus crías; en los jerbos, regula la producción de los gritos durante la cópula. Pero seguramente esos animales son una excepción. En los humanos y los simios —y quizás en la mayoría de los animales— el hemisferio derecho es responsable de las vocalizaciones emocionales, mientras que el hemisferio izquierdo lo es de las rutinarias.

La comunicación no vocal en los humanos tiene antecedentes evolutivos. Los chimpancés tienden a usar la derecha no sólo cuando manipulan objetos, sino también cuando se comunican mediante gestos. Los gorilas suelen incorporar la mano derecha en las comunicaciones complejas en que intervienen, además, la testa y la boca. Adrien Meguerditchian y Jacques Vauclair, ambos de la Universidad de Provenza, han observado que los babuinos prefieren la mano derecha para cierta comunicación manual (golpear el suelo).

El significado evolutivo de todo ello se hace manifiesto cuando uno se fija en que los humanos tendemos a realizar gestos comunicativos con la mano derecha. El comportamiento lateralizado que compartimos humanos y babuinos hace pensar que la comunicación con la mano derecha surgió con la aparición de nuestro antepasado símico común. Esa criatura se originó quizás hace unos 40 millones de años, bastante antes del inicio de la evolución de los homínidos.

## La división del trabajo en los hemisferios



▲ Dibujo original

En un experimento clásico, Dean C. Delis, de la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores pidieron a pacientes con lesión cerebral que estudiaran el dibujo de una letra **H** mayúscula grande formada por letras **A** pequeñas (*izquierda*) y la reprodujeran luego de memoria. Los pacientes con el hemisferio derecho dañado (dependientes sólo del hemisferio izquierdo) a menudo trazaban simplemente letras **A** repartidas por toda la página (*abajo a la izquierda*). Los pacientes con el hemisferio izquierdo dañado con frecuencia dibujaban sólo una **H** mayúscula sin letras **A** (*abajo a la derecha*). Así pues, el hemisferio izquierdo humano identifica los estímulos a partir de uno o pocos detalles, mientras que el derecho se especializa en la síntesis de las características generales.



Los pacientes con lesión en el hemisferio derecho recordaban los detalles del dibujo original, pero no su configuración global.

Los pacientes con lesión en el hemisferio izquierdo reproducían la figura general, pero no los detalles.

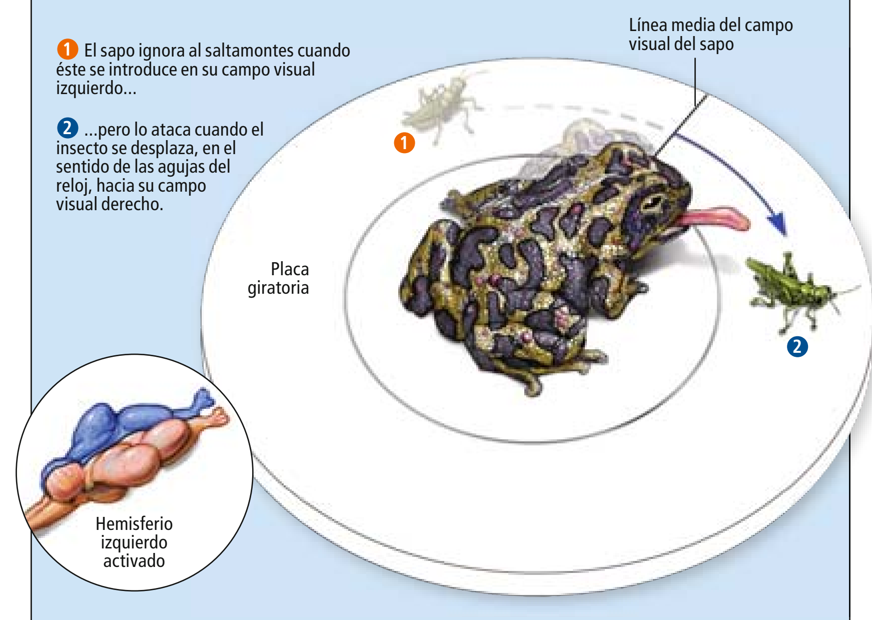
ANDREW SWIFT; FUENTE: "HEMISPHERIC SPECIALIZATION OF MEMORY FOR VISUAL HIERARCHICAL STIMULI", POR D. C. DELIS ET AL., EN *NEUROPSYCHOLOGIA*, VOL. 24, N.º 2; 1986


## Los autores

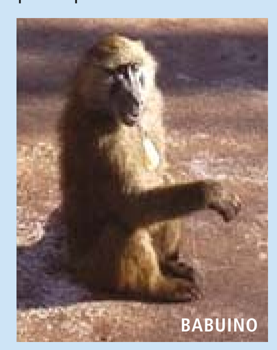
**Peter F. MacNeilage** es profesor de psicología en la Universidad de Texas en Austin. Se ha especializado en la evolución de sistemas de acción complejos. **Lesley J. Rogers** es profesora emérita de neurociencia y etología en la Universidad de Nueva Inglaterra, en Armidale. Descubrió la lateralización del prosencéfalo de los polluelos cuando todavía se pensaba que era un fenómeno exclusivo del cerebro humano. **Giorgio Vallortigara** es profesor de neurociencia cognitiva en el Centro para las Ciencias de la Mente y el Cerebro, del departamento de ciencias cognitivas de la Universidad de Trento. Junto con Rogers, aportó las primeras pruebas de la asimetría cerebral funcional en peces y anfibios.

## CONTROL DE LA CONDUCTA RUTINARIA

La tendencia a utilizar el lado derecho del cuerpo (hemisferio cerebral izquierdo) para controlar los patrones de conducta en circunstancias ordinarias se ha descrito en casi todas las clases de vertebrados estudiados hasta la fecha. La captura de una presa corresponde a un comportamiento rutinario típico. En el experimento esquematizado abajo, se pegó un saltamontes ficticio a una placa giratoria y ésta se hizo rotar hacia un lado u otro del campo visual de un sapo. Cuando el saltamontes se situó a la izquierda del sapo y se desplazó en el sentido de las agujas del reloj, el sapo no atacó al insecto hasta que éste cruzó la línea media hacia el lado derecho del campo visual. Cuando la presa se desplazó en el sentido contrario al de las agujas del reloj, el sapo le atacó menos veces y con una frecuencia similar en cada campo visual (*no ilustrado*).




▼ Entre otros muchos animales que exhiben una preferencia por el lado derecho en ciertas conductas se incluyen los babuinos y las ballenas. Fenómeno que nos habla del control por parte de la mitad izquierda del cerebro. Adrien Meguerditchian y Jacques Vauclair, de la Universidad de Provenza, han observado que los babuinos parecen comunicarse golpeando el suelo con la mano derecha. Phillip J. Clapham, del Centro de Ciencia Pesquera de Alaska en Seattle, descubrió que las ballenas sufrían excoriaciones sobre todo en el lado derecho de la mandíbula, lo que indicaba que preferían ese lado para capturar alimentos.







### Evolución del habla

Queda por resolver la cuestión fundamental de cómo se modificaron los comportamientos ya controlados por el hemisferio izquierdo —alimentación, vocalización, comunicación con la mano derecha— para convertirse en habla, uno de los avances conspicuos de la historia de la vida en la Tierra.

Uno de los autores (MacNeilage) ha propuesto que el cambio de marras exigió la evolución de la sílaba, la unidad básica de organización que subyace bajo la emisión articulada de voz. La sílaba suele corresponder a una alternancia entre consonantes y vocales. (Las consonantes corresponden a los sonidos creados cuando por un momento se cierra totalmente, o casi del todo, el aparato vocal; las vocales son los sonidos creados por resonancia con la forma del aparato vocal cuando el aire fluye a través de la boca abierta.) La sílaba pudo haber evolucionado como resultado del ascenso (consonante) y descenso (vocal) alternados de la mandíbula, una conducta que ya estaba bien arraigada en las acciones de mascar, succionar y lamer. Una serie de esos ciclos bucales, producidos al chasquear los labios, habrían empezado a servir como señales de comunicación entre los primeros humanos, igual que hacen hoy en día otros primates.

Algo más tarde, las capacidades de vocalización de la laringe se harían coincidir con los chasquidos comunicativos de los labios para formar las sílabas habladas. Las sílabas quizá se utilizaron primero para simbolizar conceptos aislados, con lo que aparecieron las palabras. Posteriormente, la capacidad de formar frases (lenguaje) se habría desarrollado cuando los primeros humanos combinaron los dos tipos de palabras que dan el significado principal a las frases: las que se refieren a objetos (nombres) y las que describen acciones (verbos).

### El hemisferio derecho

¿Y qué ocurre con la otra mitad de nuestra hipótesis? ¿Qué solidez tienen las pruebas de que, al inicio de la evolución de los vertebrados, el hemisferio derecho se especializó en la detección y respuesta ante estímulos inesperados del medio? ¿De qué manera evolucionó y se transformó esa especialización básica?

Parte de los datos que respaldan nuestra hipótesis procede de los estudios sobre las reacciones de distintos animales ante sus depredadores. Después de todo, en el entorno de los primeros vertebrados pocos acontecimientos causaban más sorpresa y emoción que la aparición imprevista de un depredador mortal. En efecto, peces, anfibios, aves y mamíferos eluden mejor los depredadores que ven en el lado izquierdo de su campo visual (hemisferio derecho) que en el lado derecho de dicho campo.

Las pruebas de que la especialización hemisférica respecto a las reacciones es también válida en los humanos provienen del análisis de imágenes cerebrales. En un resumen del estado de la cuestión, Michael D. Fox y sus colaboradores, de la Universidad de Washington en San Luis, arribaron a la conclusión de que los humanos poseían un “sistema de atención” en el hemisferio derecho particularmente sensible

ANDREW SWIFT; FUENTES: “COMPLEMENTARY RIGHT AND LEFT HEMIFIELD USE FOR PREDATORY AND AGONISTIC BEHAVIOR”, POR G. VALLORTIGARA ET AL., EN *NEUROREPORT*, VOL. 9, N.º 14; 1998, Y “LATERALIZED PREY CATCHING RESPONSES IN THE CANE TOAD, *BUFO MARINUS*: ANALYSIS OF COMPLEX VISUAL STIMULI”, POR A. ROBINS Y L. J. ROGERS, EN *ANIMAL BEHAVIOUR*, VOL. 68, N.º 4; 2004; ADRIEN MEGUERDITCHIAN Y JACQUES VAUCLAIR, *Universidad de Provenza* (*babuino*); FUENTE: “BABOONS COMMUNICATE WITH THEIR RIGHT HAND”, POR A. MEGUERDITCHIAN Y J. VAUCLAIR, EN *BEHAVIOURAL BRAIN RESEARCH*, VOL. 171, N.º 1; 2006; PROVINCETOWN CENTER FOR COASTAL STUDIES (*ballena*)

a estímulos inesperados y relacionados con la conducta (el tipo de estímulos que avisan: ¡Peligro!). La existencia de ese sistema de atención ayuda a entender una predisposición que presentan los humanos, de otro modo inexplicable: en el laboratorio, hasta las personas diestras responden con mayor celeridad a estímulos inesperados con su mano izquierda (hemisferio derecho) que con la derecha.

Incluso en situaciones que no entrañan peligro, muchos vertebrados mantienen el ojo izquierdo al acecho frente a cualquier depredador visible. Esta especialización temprana del hemisferio derecho para el estado de alerta en presencia de depredadores conlleva, en numerosos animales, un comportamiento agresivo. Sapos, camaleones, polluelos y babuinos suelen atacar más a los miembros de su propia especie situados a su izquierda que a los que se hallan a su derecha.

En los humanos, las conductas primitivas de evasión y cautela, que se corresponden con el sistema de atención del hemisferio derecho en el resto de los animales, han adoptado la forma de un abanico de emociones negativas. Los médicos del siglo XIX se dieron cuenta de que los pacientes sufrían con mayor frecuencia parálisis psicógena en las extremidades del lado izquierdo que en las del derecho. No faltan pruebas que confirman el control del hemisferio derecho sobre los llantos y gritos emocionales en los humanos, en marcado contraste con el control del hemisferio izquierdo sobre las vocalizaciones emocionalmente neutras. Las personas padecen depresión con mayor probabilidad tras una lesión en el hemisferio izquierdo que en el derecho. Y en los estados de depresión crónica, el hemisferio derecho es más activo que el izquierdo.

## Reconocimiento de los otros

Además de la aparición repentina de un depredador, los cambios en el entorno más sobresalientes ante los que debían reaccionar con prontitud los primeros vertebrados eran los encuentros con otros individuos de su propia especie. En los peces y las aves, el hemisferio derecho reconoce a los compañeros del grupo y vigila el comportamiento social que podría exigir una reacción inmediata. La función del hemisferio derecho en la percepción facial debió hundir su raíz en la capacidad de los primeros vertebrados para reconocer la apariencia visual de otros individuos de su especie.

En los peces, sólo algunas especies (entre los vertebrados más primitivos) podrían hallarse capacitados para reconocer especímenes individuales. Las aves, en cambio, suelen demostrar capacidad para identificar a otros individuos, dirigida por el hemisferio derecho. Keith M. Kendrick, de la Universidad de Cambridge, ha incluido en esos ejemplos a los mamíferos: ha demostrado que las ovejas recuerdan la cara de otras ovejas (y de personas), proceso en el que interviene de modo preferente el hemisferio derecho. Charles R. Hamilton y Betty A. Vermeire, de la Universidad de Texas A&M, han observado en los simios un comportamiento similar.

En los humanos, el hemisferio derecho se especializa en el reconocimiento facial. La prosopagnosia, un trastorno neurológico en el que se ve alterada tal capacidad, es con mayor frecuencia el resultado de una lesión en el hemisferio derecho que en el izquierdo. Más allá del reconocimiento facial, en otro nivel, observamos que simios y humanos interpretan con mayor exactitud con el hemisferio derecho que con el izquierdo las expresiones faciales emotivas. Pensamos que semejante destreza forma parte de una antigua capacidad evolutiva del hemisferio derecho para determinar la identidad o la familiaridad; para juzgar, por ejemplo, si un estímulo es nuevo o repetido.

## Global y local

Según los autores, existe una distinción básica entre la función del hemisferio izquierdo en las acciones normales y la del hemisferio derecho en las poco corrientes. Pero ésta no es la única dicotomía hallada en la función hemisférica. En los humanos, el hemisferio derecho "capta

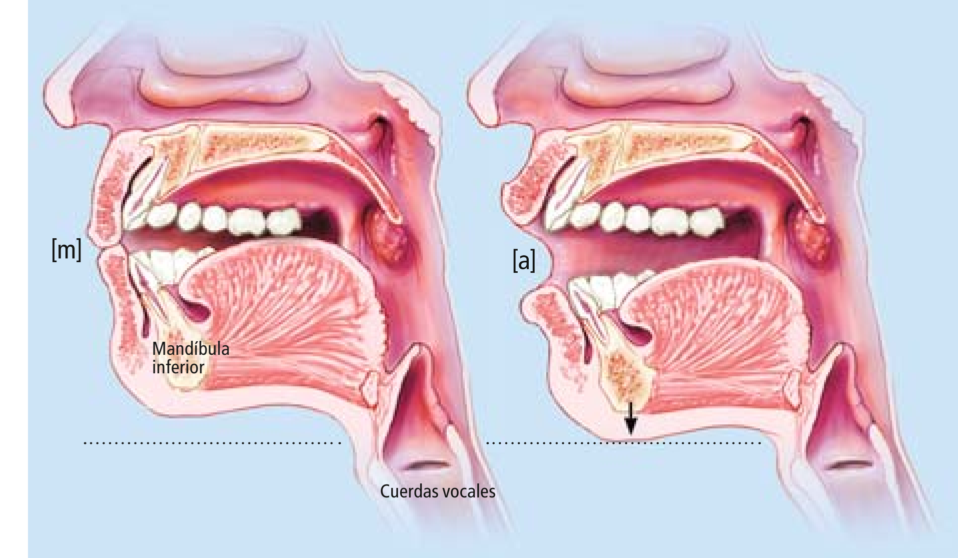
## LA IZQUIERDA FOTOGENICA

**Un estudio de 1999 de los cuadros de la Galería Nacional de Retratos londinense analizó la dirección hacia la que volvían la cabeza los modelos de los retratos.**

- En conjunto, los modelos volvían la cabeza ligeramente hacia la derecha, mostrando el lado izquierdo del rostro. Concluyeron que éstos preferían exhibir su lado izquierdo porque éste estaba controlado por el hemisferio cerebral "emotivo", el derecho.
- Los retratos de varones, sin embargo, presentaban una escasa desviación hacia la izquierda, quizá con la intención de ocultar las emociones.
- Los retratos de científicos de la Regia Sociedad no muestran desviación hacia la izquierda.

## El mascar: ¿origen de la sílaba?

Según uno de los autores (MacNeilage), el origen del habla humana puede encontrarse en la evolución de la sílaba (alternancia entre consonante y vocal). En la palabra "mamá" cada sílaba empieza por el sonido de la consonante [*m*] y termina con el de la vocal [*a*]. El sonido [m] se forma al subir la mandíbula, o maxilar inferior, y cerrar los labios para impedir el flujo de aire desde los pulmones (*izquierda*). Para emitir el siguiente sonido, la vocal [*a*], la mandíbula desciende, se separan los labios y el aire fluye libremente (*derecha*). MacNeilage ha propuesto que la articulación de las sílabas corresponde a una modificación evolutiva del acto rutinario de mascar, que apareció en los mamíferos hace unos 200 millones de años.



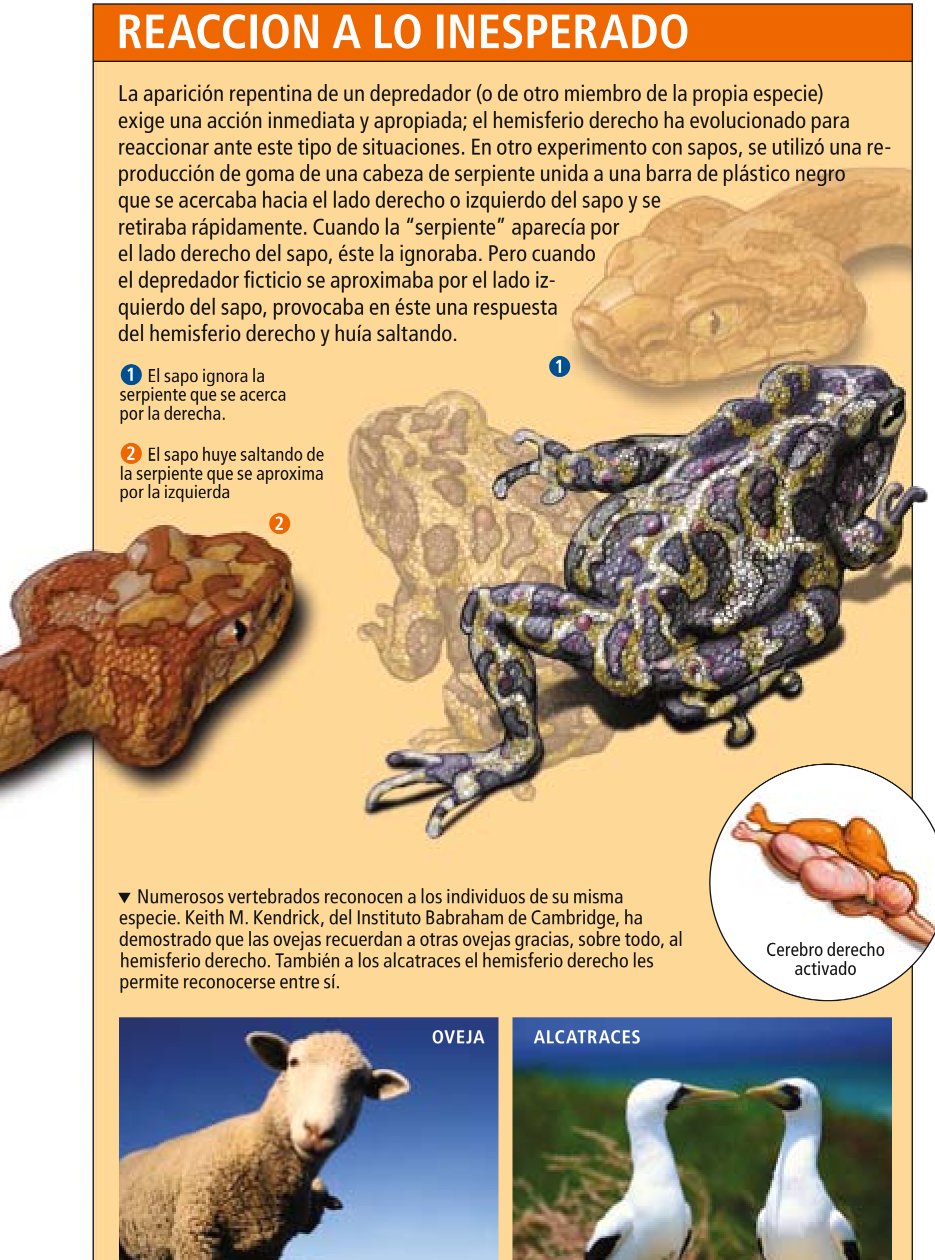

ANDREW SWIFT; FUENTE: SUSANNA DOUGLAS *Universidad de Tejas en Austin*

el conjunto de la escena", atendiendo a los aspectos globales del entorno, en vez de centrarse en unas pocas características. Esa capacidad le ofrece unas ventajas notables en el análisis de las relaciones espaciales. Los recuerdos almacenados por el hemisferio derecho tienden a organizarse y a recuperarse como un todo, no como una serie de elementos independientes. Por el contrario, el hemisferio izquierdo tiende a fijarse en aspectos locales del entorno.

Una clara demostración de la dicotomía global-local en los humanos salió a la luz con el experimento de David Navon, de la Universidad de Haifa. Se pidió a pacientes con lesión cerebral que reprodujeran un dibujo que consistía en unas 20 copias pequeñas de la letra A mayúscula, distribuidas en el papel formando una magna H mayúscula. Los pacientes con el hemisferio izquierdo dañado trazaban a menudo un dibujo lineal simple de la letra H, sin incluir ninguna letra A; los pacientes con el hemisferio derecho dañado repartían de forma aleatoria por toda la página letras A.

## REACCION A LO INESPERADO

La aparición repentina de un depredador (o de otro miembro de la propia especie) exige una acción inmediata y apropiada; el hemisferio derecho ha evolucionado para reaccionar ante este tipo de situaciones. En otro experimento con sapos, se utilizó una reproducción de goma de una cabeza de serpiente unida a una barra de plástico negro que se acercaba hacia el lado derecho o izquierdo del sapo y se retiraba rápidamente. Cuando la "serpiente" aparecía por el lado derecho del sapo, éste la ignoraba. Pero cuando el depredador ficticio se aproximaba por el lado izquierdo del sapo, provocaba en éste una respuesta del hemisferio derecho y huía saltando.




▼ Numerosos vertebrados reconocen a los individuos de su misma especie. Keith M. Kendrick, del Instituto Babraham de Cambridge, ha demostrado que las ovejas recuerdan a otras ovejas gracias, sobre todo, al hemisferio derecho. También a los alcatraces el hemisferio derecho les permite reconocerse entre sí.

ANDREW SWIFT; FUENTE: "LATERALISATION OF PREDATOR AVOIDANCE RESPONSES IN THREE SPECIES OF TOADS", POR G. LIPPOLIS ET AL., EN *LATERALITY*, VOL. 7, N.º 2; 2002; JOHN GIUSTINA *Getty Images* (*oveja*); KEVIN MORRIS *Getty Images* (*alcatraces*)

En las gallinas se ha descrito una dicotomía similar, lo que indica la evolución temprana de ese rasgo. Richard J. Andrew, de la Universidad de Sussex, y uno de nosotros (Vallortigara) hemos descubierto que, igual que en los humanos, los polluelos prestan una atención especial mediante su hemisferio derecho a las relaciones espaciales generales. Asimismo, los polluelos con el ojo derecho tapado (reciben información sólo en el hemisferio derecho) demuestran interés hacia un amplio abanico de estímulos, lo que sugiere que captan el entorno de forma global. Los polluelos que prestan atención sólo con el hemisferio izquierdo (ojo izquierdo tapado) se centran únicamente en características prominentes, locales y específicas.

### El porqué de la lateralización

¿Por qué los vertebrados tienden a destinar determinadas funciones a una u otra mitad del cerebro? Para valorar un estímulo concreto, un organismo debe realizar de forma simultánea dos tipos de análisis. Por un lado, ha de estimar la novedad global del estímulo y emprender una acción inmediata y decidida en caso necesario (hemisferio derecho). Por otro, tiene que establecer si el estímulo encaja en alguna clase conocida para dar una respuesta sólidamente asentada, en el supuesto de que la hubiere, destinada a ese fin (hemisferio izquierdo).

Para detectar algo novedoso, el organismo debe estar atento a las características que singularizan a una experiencia. La percepción espacial necesita ese mismo tipo de "olfato para la novedad", pues cualquier punto de vista que adopte un animal acarrea en consecuencia una nueva configuración de estímulos. Tal función cumple al hemisferio derecho. En cambio, para clasificar una experiencia, el organismo debe reconocer cuál de sus elementos se repite, al tiempo que ignora o descarta los que son peculiares o idiosincrásicos. El resultado de ello es una atención selectiva, una de las capacidades más importantes del cerebro. De ello se encarga el hemisferio izquierdo.

Quizás esas especializaciones hemisféricas se desarrollaron inicialmente porque, en su conjunto, resultaban más eficientes en la elaboración simultánea de ambos tipos de información que un cerebro sin dicha especializa-

ción. Para someter a contrastación la hipótesis, necesitábamos comparar las capacidades de animales dotados de cerebro lateralizado con animales de la misma especie sin lateralización. Si andábamos en lo cierto, los individuos con cerebro lateralizado realizarían funciones paralelas de los hemisferios izquierdo y derecho con mayor eficiencia que los individuos sin lateralización.

Afortunadamente, uno de los autores (Rogers) ya había demostrado que, mediante la exposición de un embrión de pollo a la luz o a la oscuridad antes de la eclosión del huevo, se manipulaba el desarrollo de la especialización hemisférica para ciertas funciones. Justo antes de la eclosión, la cabeza del embrión se halla doblada, de suerte que el ojo izquierdo queda tapado por el cuerpo y sólo el ojo derecho recibe la estimulación de la luz que atraviesa la cáscara. La luz promueve el desarrollo de algunas especializaciones hemisféricas para la elaboración visual. Mediante la incubación de huevos en la oscuridad, Rogers inhibió el desarrollo de esas especializaciones. Descubrió que la ausencia de luz impedía que el hemisferio izquierdo adquiriera su capacidad superior normal para distinguir los granos comestibles de las piedrecillas y anulaba la mayor reactividad del hemisferio derecho hacia los depredadores.

Rogers y Vallortigara, en colaboración con Paolo Zucca, sometieron a ambos tipos de polluelos (incubados con o sin luz) a una tarea doble: descubrir granos comestibles esparcidos entre las piedras mientras vigilaban la aparición de un depredador (simulado) por encima de su cabeza. Los polluelos incubados con luz podían realizar ambas tareas de forma simultánea; los incubados a oscuras, no. Con ello se confirmó que un cerebro lateralizado elaboraba la información con mayor eficiencia.

## Asimetría cerebral en el grupo

Si bien la elaboración independiente y en paralelo de las tareas en los dos hemisferios permite aumentar la eficiencia cerebral, no explica el predominio de una u otra especialización en una especie determinada. ¿Por qué, en la mayoría de los animales, el ojo izquierdo (hemisferio derecho) es más apto que el ojo derecho (hemisferio izquierdo) para vigilar a los depredadores? ¿Por qué en la dominancia manual se favorece un determinado lado, en lugar de haber una proporción equilibrada, mitad a mitad, de diestros y zurdos?

Desde el punto de vista evolutivo, el desequilibrio a favor de un lado (ruptura de la simetría), con poblaciones formadas principalmente por individuos zurdos o por individuos diestros, podría parecer desventajoso porque resulta en un comportamiento más predecible para los depredadores. Estos podrían aprender a atacar por el lado menos vigilante de la presa, reduciendo así las posibilidades de ser descubierto. La proporción desigual entre individuos zurdos y diestros en numerosas poblaciones indica, pues, que el desequilibrio debe ser tan valioso, que se mantiene a pesar de aumentar la vulnerabilidad frente a los depredadores. Rogers y Vallortigara han propuesto que, entre los animales sociales, la ventaja de esa semejanza quizá reside en que permite prever el comportamiento de los miembros de tu misma especie.

Junto con Stefano Ghirlanda, Vallortigara ha demostrado en fecha reciente, mediante modelos matemáticos, la formación espontánea de poblaciones con predominio de individuos diestros o zurdos, si tales poblaciones presentan costes y beneficios dependientes de la frecuencia. Según la teoría de juegos, la mejor estrategia que puede adoptar un individuo dependerá de lo que la mayoría de los otros miembros de su especie decida hacer. Aplicando esta teoría, Ghirlanda y Vallortigara han demostrado que una población se inclina por un lado más que por otro en función de las presiones sociales de selección (situaciones en las que los individuos asimétricos deben coordinarse con otros de su especie). Por ejemplo, cabría esperar que los peces que forman cardúmenes desarrollaran en su mayoría las mismas preferencias de giro, ya que es la mejor manera de permanecer juntos en el banco. Por el contrario, los peces solitarios, que no necesitan nadar en grupo, podrían probablemente presentar una conducta de giro aleatoria; y eso es precisamente lo que ocurre.

## Un cerebro lateralizado es más eficiente

Uno de los autores (Rogers) descubrió que mediante el control de la luz que recibían embriones de pollo antes de que el huevo hiciera eclosión podía determinar si los hemisferios cerebrales adquirían las especializaciones para la elaboración visual, es decir, si los polluelos nacían con el cerebro fuerte o débilmente lateralizado. Rogers y Vallortigara (otro de los autores), en colaboración con Paolo Zucca, de la Universidad de Teramo, compararon luego la capacidad de realizar dos tareas de los polluelos normales, con una fuerte lateralización (incubados con luz), respecto a los polluelos con una lateralización débil (incubados a oscuras). Una de las tareas consistía en seleccionar granos comestibles entre piedrecillas (trabajo atribuido al hemisferio izquierdo); la otra era reaccionar frente a un depredador ficticio (un recortable con la forma de un halcón) que se hacía volar por encima de los polluelos (tarea asignada al hemisferio derecho). Los polluelos con una lateralización débil aprendían sin problemas, en ausencia del halcón de cartón, a distinguir el alimento de las piedras. Pero cuando el halcón sobrevolaba sus cabezas, a menudo no lograban identificar el alimento y tardaban más que los polluelos normales en picotear la comida y no las piedras. En resumen, sin la especialización de sus hemisferios cerebrales, los polluelos eran incapaces de atender a dos tareas al mismo tiempo.

STOCKBYTE *Getty Images* (polluelo)

## Bibliografía complementaria


COMPARATIVE VERTEBRATE LATERALIZATION. Dirigido por L. J. Rogers y R. J. Andrew. Cambridge University Press, 2002.

ADVANTAGES OF HAVING A LATERALIZED BRAIN. Lesley J. Rogers, Paolo Zucca y Giorgio Vallortigara en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 271, Supl. 6, págs. S420-S422; 7 de diciembre, 2004.

SURVIVAL WITH AN ASYMMETRICAL BRAIN: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF LATERALIZATION. G. Vallortigara y L. J. Rogers en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 28, n.º 4, págs. 575-633; agosto, 2005.

THE ORIGIN OF SPEECH. P. F. MacNeilage. Oxford University Press, 2008.

MECHANISMS AND FUNCTIONS OF BRAIN AND BEHAVIOURAL ASYMMETRIES. Dirigido por L. Tommasi. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, págs. 855-859; 12 de abril, 2009.

# El origen de la vida

*Sobre el descenso de electrones en el metabolismo primitivo*

**James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith**

**CONCEPTOS BASICOS**

- Según la hipótesis de la "sopa primordial", la vida surgió por azar en un caldo de moléculas orgánicas simples. La vida correspondería, pues, a un "accidente congelado".
- Otra idea, la del "ARN primordial", propone que la vida atravesó una fase temprana en la que dominaba el ARN, una biomolécula con funciones catalíticas y hereditarias.
- Los autores proponen un escenario distinto, gobernado por la termodinámica: un ciclo metabólico reductor compuesto por entramados sencillos de moléculas pequeñas sentó las bases de la biosíntesis primordial.
- Si la vida fue el resultado inevitable y progresivo del funcionamiento de las leyes de la física y la química, ésta puede desarrollarse en cualquier planeta cuya química se parezca a la de la Tierra primitiva.

A medida que las fronteras del conocimiento se han ido extendiendo, los científicos han respondido, uno tras otro, a los interrogantes sobre la creación. Hoy en día, nuestros conocimientos sobre el origen del Sol y de la Tierra son notables; los cosmólogos pueden trasladarnos hasta las fracciones de segundo inmediatamente posteriores a la creación del universo. Sabemos el modo en que la vida, una vez comenzada, proliferó y se diversificó hasta ocupar —y en muchos casos, crear— todos los nichos del planeta. Sin embargo, queda pendiente una de las cuestiones más esenciales: ¿cómo surgió la vida a partir de la materia inorgánica?

Nuestro progreso a la hora de resolver esta cuestión ha estado limitado por una imponente barrera cognitiva. Cuando pensamos en las diferencias que existen entre la materia inorgánica y la vida, somos conscientes de cuán profundas son; tenemos, por ello, la impresión de que la naturaleza debe de haber dado un gran salto para superar ese hiato. Tal es la visión que ha impulsado la búsqueda de los mecanismos mediante los cuales se formaron, a lo largo de la historia de la Tierra, macromoléculas de elevada complejidad, una tarea sobrecogedora.

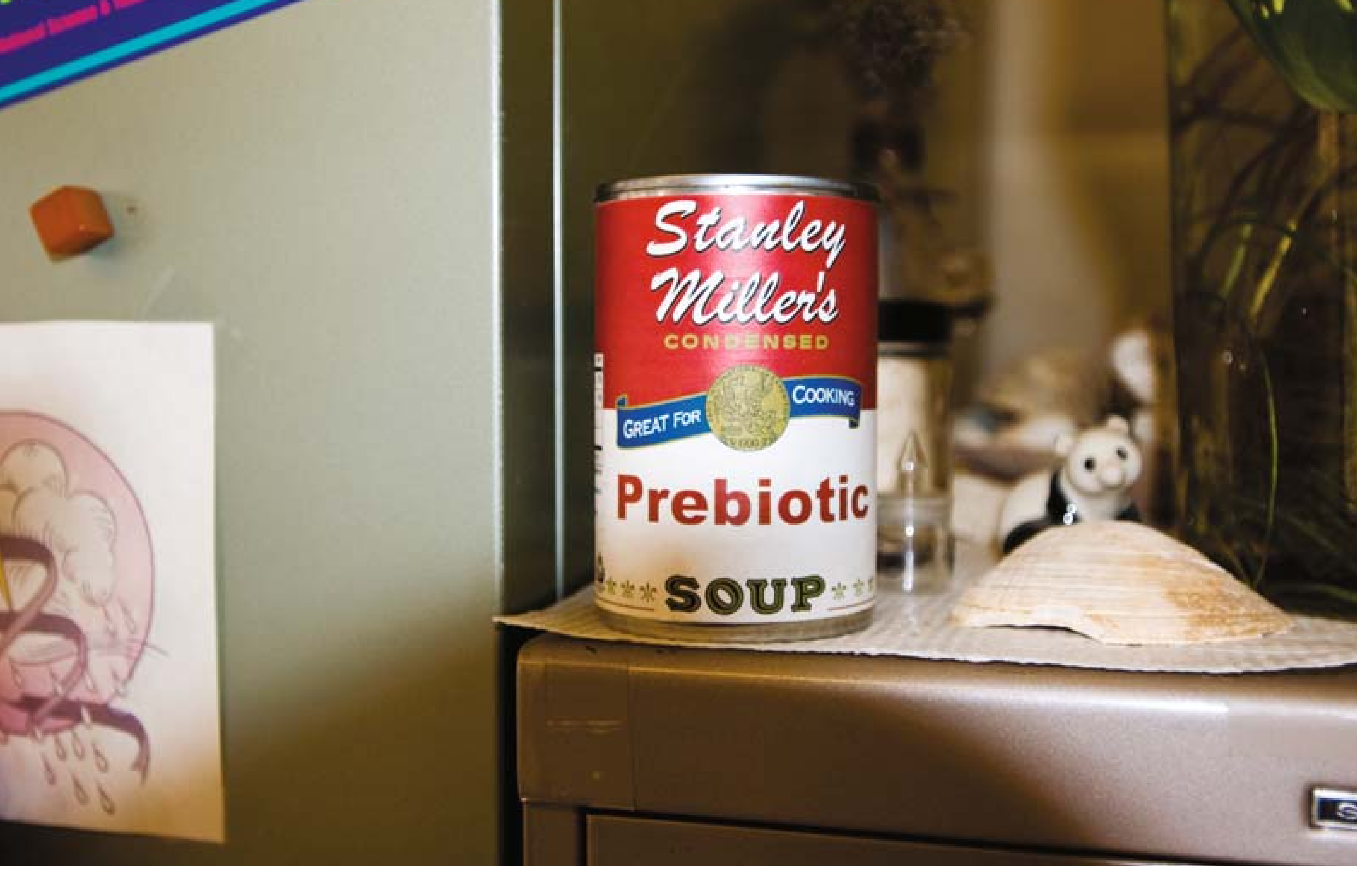
El problema esencial estriba en que, en los sistemas vivos actuales, las reacciones químicas de las células se hallan mediadas por enzimas, unos catalizadores de naturaleza proteínica. Para fabricar las proteínas se necesita la información codificada en los ácidos nucleicos (ADN y ARN); sin embargo, para sintetizar los ácidos nucleicos se necesitan proteínas. Además, proteínas y ácidos nucleicos son macromoléculas, que se forman por la concatenación de las pequeñas moléculas que los componen, cuya síntesis es supervisada por ambos, proteínas y ácidos nucleicos. Tenemos, pues, dos gallinas, dos huevos y ninguna respuesta para la pregunta de quién fue primero.

En este artículo presentamos una hipótesis que está ganando adeptos entre los expertos y que deja de lado la cuestión del huevo y la gallina para centrarse de lleno en el ámbito de la química verosímil. Las primeras etapas del proceso que condujo a la vida fueron el resultado inevitable y progresivo del funcionamiento de las leyes de la física y la química en las condiciones de la Tierra primitiva, un resultado que puede interpretarse en los términos de las leyes de la naturaleza conocidas (o que, al menos, pueden conocerse). Las primeras etapas de la aparición de la vida no son, pues, más sorprendentes ni más fortuitas que un reguero de agua fluyendo cuesta abajo.

El nuevo enfoque requiere que modifiquemos nuestra visión sobre dos importantes campos de la ciencia: la bioquímica celular y la termodinámica. Sin embargo, conviene que antes las situemos en el contexto adecuado, haciendo un pequeño repaso de la historia de la investigación sobre el origen de la vida.

## El origen de los orígenes

La era moderna de la investigación experimental sobre el origen de la vida comenzó en 1953, en un laboratorio ubicado en los sótanos del departamento de química de la Universidad de Chicago. Harold Urey, premio Nobel de química, y Stanley Miller, a la sazón estudiante de doctorado, montaron un aparato de sobremesa diseñado para estudiar los procesos químicos que podrían haber tenido lugar en el planeta poco después de su creación. Demostraron que, en condiciones ambientales naturales (disolución ácida, calor




1. LOS ESTUDIOS SOBRE EL ORIGEN DE LA VIDA se convirtieron en una ciencia empírica gracias al experimento de Miller-Urey, en el que a partir de los componentes que supuestamente se encontraban en la atmósfera paleogeológica se produjeron en un frasco moléculas orgánicas (una "sopa primordial" casera). Pero, ¿cómo se pasó de los componentes de la sopa a la vida? El modelo "primero el metabolismo" propone que la vida no tuvo que superar ninguna barrera termodinámica, sino que apareció a partir de leyes cognoscibles de la química y la termodinámica.

CORTESIA DE LA INSTITUCION SCRIPPS DE OCEANOGRAFIA, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, SAN DIEGO/*American Scientist*

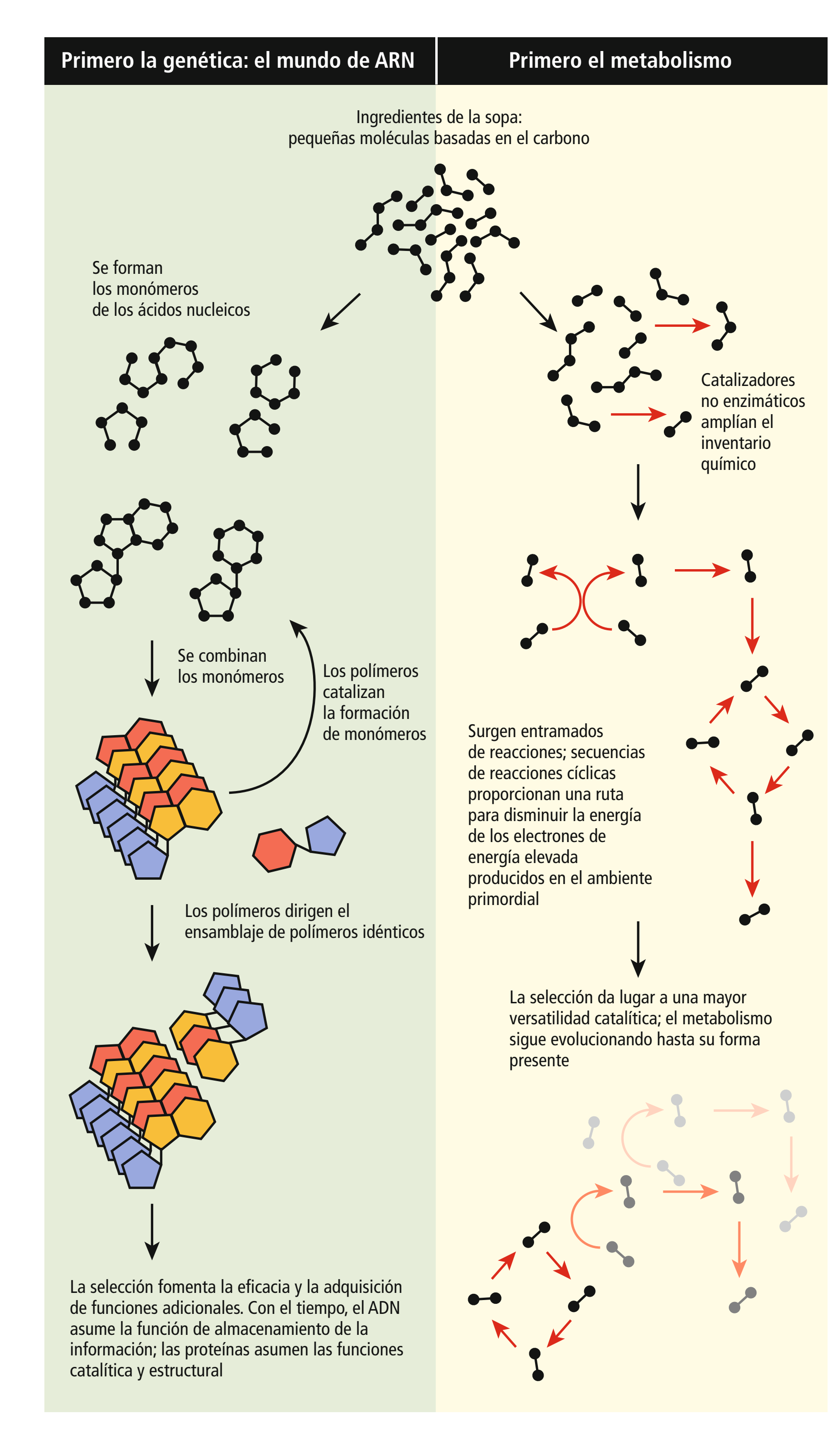
y descargas eléctricas, o rayos), podían crearse moléculas orgánicas (aminoácidos) a partir de materiales inorgánicos y sin la intervención de enzimas.

Tamaño descubrimiento desencadenó una oleada de nuevas ideas sobre el origen y la naturaleza de la vida. (Hoy en día, se considera que los componentes atmosféricos que Miller y Urey colocaron en su aparato eran erróneos, de manera que el proceso que descubrieron no representaba la aparición de vida sobre la Tierra. Con todo, sirvió para destacar el potencial de fecundidad y de diversidad que poseía la química primordial en ausencia de enzimas.)

Desde 1953, se han descubierto muchas de esas moléculas orgánicas sencillas en meteoritos, cometas e incluso en nubes de gas interestelar. Por tanto, lejos de ser algo especial, las moléculas más sencillas que encontramos en los sistemas vivos (los materiales de construcción de la vida) parecen ser bastante comunes en la naturaleza. La cuestión fundamental sería pues: ¿de qué modo esos materiales de construcción básicos acabaron reuniéndose en sistemas vivos? ¿Cómo fueron seleccionadas, entre el desordenado medio molecular original, las moléculas que dieron lugar a la vida moderna?

La ubicuidad de las moléculas sencillas sugirió un escenario atractivo para los investigadores que a lo largo de la segunda mitad del siglo xx abordaron el origen de la vida. El escenario era el siguiente: después de que la Tierra se enfriara lo suficiente como para permitir la formación de los océanos, el proceso de Miller-Urey, u otro parecido, produjo una lluvia de materia orgánica. El océano se convirtió pronto en un caldo repleto de esas moléculas. Andando el tiempo, se produjo, por puro azar, la combinación idónea de moléculas que dio lugar a algún tipo de entidad replicante que evolucionó hasta la vida moderna. A esta hipótesis, denominada de Oparin-Haldane, se la conoce también por modelo de la "sopa primordial".

El legado de la "sopa primordial" fue doble: por un lado, simplificó la noción del origen de la vida, reduciéndolo a un acontecimiento trascendental y único; por otro, propuso que ese acontecimiento (la etapa posterior a la formación de las moléculas) fue resultado del azar. Debe considerarse la vida como un "accidente congelado". Según este enfoque, muchos de los detalles fundamentales sobre la estructura de la vida no se prestan a explicación. La arquitectura de la vida corresponde a uno de esos detalles. Aunque muchas de las teorías modernas son menos radicales que la relatada, la idea del "accidente congelado" sigue influyendo sobre el tipo de cuestiones que nos planteamos acerca del origen de la




**2. EL "MUNDO DE ARN" ha sido desde el decenio de los ochenta la teoría prevaleciente para explicar el origen de la vida. La aparición de una molécula catalítica autorreplicante explica las características distintivas de los sistemas vivos; sin embargo, no se explica el origen de esa molécula protobiológica. La hipótesis de "primero el metabolismo" busca la respuesta en entramados primitivos de reacciones que generan sus propios constituyentes, lo que proporciona un sustrato para la selección química y una plataforma de lanzamiento para la vida.**

BARBARA AULICINO Y MORGAN RYAN/*American Scientist*

vida y sobre las prioridades que establecemos en nuestros experimentos.

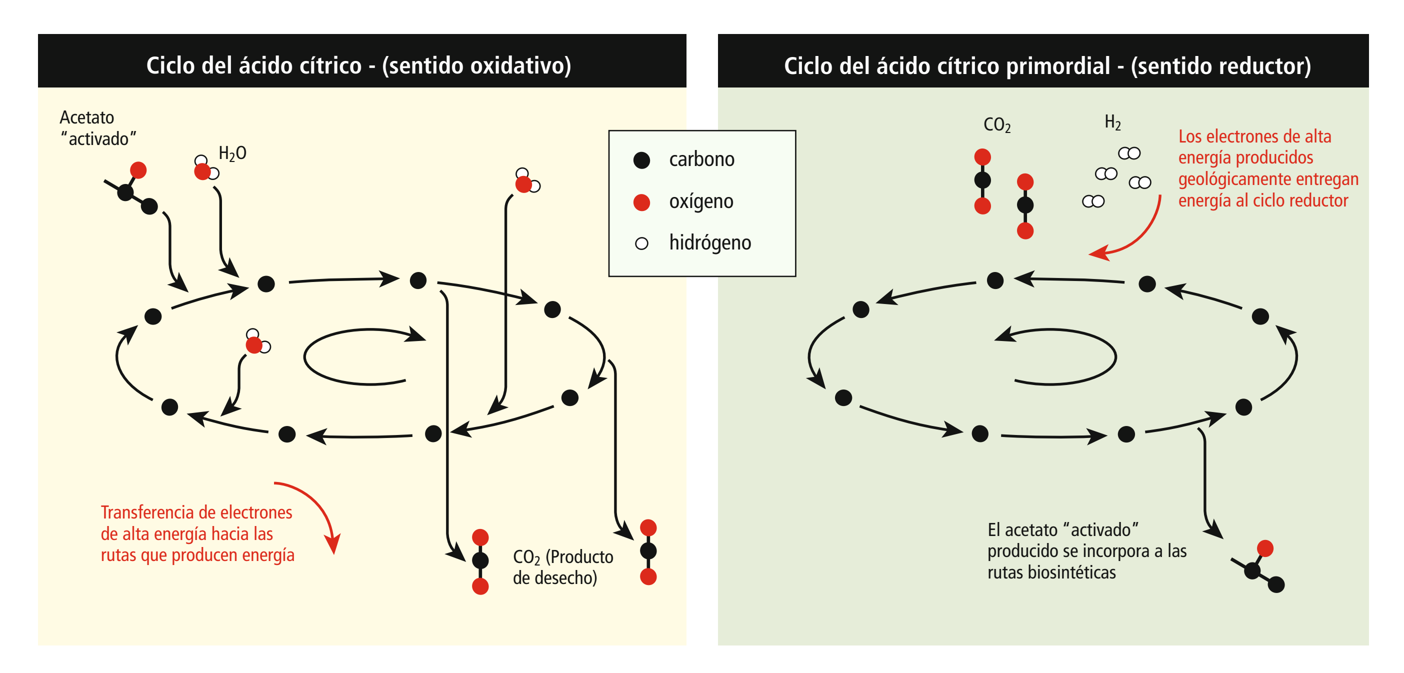
## El mundo de ARN

El siguiente avance importante se produjo a principios del decenio de los ochenta del siglo pasado, cuando Thomas Cech y Sidney Altman demostraron que algunas moléculas de ARN operaban a la manera de catalizadores, igual que las enzimas. La hipótesis del accidente congelado fue sustituida por un sugerente escenario en el que, por azar, se ensambló algo parecido al ARN, que posteriormente, en las etapas preliminares de la vida, desempeñó una función doble: enzimática y hereditaria. A continuación, la selección natural operó sobre los sistemas basados en ARN, lo que llevaría a una mayor complejidad molecular y, en última instancia, a algo parecido a la vida moderna.

La mayoría de los científicos creen, a partir de los trabajos de Cech y Altman, que la vida atravesó una fase temprana en la que dominaba el ARN ("mundo de ARN"). Este escenario basado en un "ARN primordial" presenta también las características de un "accidente congelado". Para pasar de la química prebiológica al mundo de ARN hay que dar un gran salto, que exige la aparición de moléculas con cierta semejanza con las complejas moléculas que Cech y Altman tenían en sus tubos de ensayo, ya que ésa es la premisa en la que se basa la importancia de sus hallazgos en relación con el origen de la vida.

Un escenario del tipo "primero fue el ARN" en el que no se explique cómo surgieron las moléculas de ARN nos parece una base inapropiada para establecer una teoría sobre el origen de la vida. La molécula de ARN, demasiado compleja, requiere un primer ensamblaje de monómeros y la concatenación posterior de monómeros para dar lugar a polímeros. Tratándose de un acontecimiento aleatorio en ausencia de un contexto químico estructurado, la probabilidad de que se produjera semejante secuencia de sucesos es prohibitivamente baja; asimismo, el proceso carece de una explicación química convincente. Creemos que es más lógico suponer que, para cuando fue posible encontrar ARN complejo, la vida ya había recorrido un largo camino hacia la complejidad. Además, la arquitectura química primordial se halla conservada en la química metabólica universal que observamos en la actualidad.

El punto fuerte de la hipótesis del "mundo de ARN" estriba en la existencia de una molécula primordial dotada de capacidad catalítica y hereditaria (facultad de propagar su identidad química a lo largo de generaciones). A medida que aumentaba la versatilidad cata-






**3. EL CICLO DEL ACIDO CITRICO es universal en los organismos modernos. Sin embargo, en numerosas especies microbianas opera en sentido inverso al habitual: en lugar de oxidar la molécula combustible acetato ("activada" mediante la unión a una molécula transportadora), con la consiguiente liberación de $CO_2$ como producto de desecho, incorpora $CO_2$ a las moléculas orgánicas aprovechando el potencial de transferencia electrónica (poder reductor) de moléculas de origen geológico como el $H_2$. Ello sugiere que un ciclo reductor podría haber sentado las bases de la biosíntesis primordial.**

lítica de esas moléculas primordiales de ARN por medio de variaciones aleatorias y selección, empezó a surgir la complejidad metabólica. A partir de esa etapa, el ARN participó en el control del metabolismo y en la continuidad a través de generaciones, tal y como hace hoy en día. Según cuál sea la función privilegiada, estos modelos globales se han denominado "primero el control" ("primero el metabolismo") o "primero la genética". En cualquier caso, la proliferación del metabolismo dependía de que el ARN ya estuviese allí.

En nuestra versión de "primero el metabolismo", las etapas iniciales que condujeron a la vida no necesitaban ni ADN ni ARN; puede que ni siquiera se vieran implicados compartimentos espaciales (como las células). Las primeras reacciones podrían haberse desarrollado en los huecos de rocas porosas, llenos de geles orgánicos que se depositaron allí, tal y como sugería el modelo de Oparin-Haldane. El metabolismo primitivo consistía en una serie de reacciones químicas sencillas, que transcurrían sin la ayuda de enzimas complejas, por medio de la actividad catalítica de entramados de moléculas pequeñas, quizás ayudadas por minerales allí presentes. Si el entramado generaba sus propios constituyentes (era recurrente), podría constituir el núcleo de un sistema químico con capacidad de autoamplificarse y sujeto a la selección.

Proponemos que surgió un sistema de ese tipo y que buena porción de ese núcleo inicial se conserva en la parte universal de la bioquímica moderna, es decir, en las secuencias de reacciones que comparten todos los seres vivos. Se habrían ido añadiendo ulteriores elaboraciones a medida que se formaron las células y quedaron bajo el control del ARN, y a medida también que los organismos fueron especializándose en su idoneidad para integrarse en ecosistemas más complejos.

Los entramados de rutas sintéticas recurrentes y con capacidad autocatalítica constituyen un capítulo conocido de la química orgánica. Se caracterizan por generar gran cantidad de productos secundarios que pueden interrumpir el sistema de reacciones o, sencillamente, diluir los reactivos evitando que se acumulen en una ruta. Para que en ese tipo de entramado se produzca selección química debe haber un elemento clave: un sistema de retroinhibición que autoelimine las reacciones secundarias y que dé lugar a un conjunto limitado de rutas con capacidad de concentrar los reactivos, tal y como hace el metabolismo.

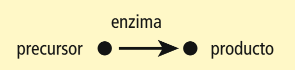
La existencia de tal sistema autodepurador no se ha demostrado todavía. Su búsqueda constituye uno de los mayores retos de quienes investigan la hipótesis de "primero el metabolismo".

## Un par de analogías

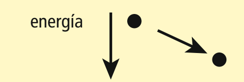
Veamos una analogía que permitirá comprender mejor el argumento que planteamos: consideremos el sistema de autopistas interestatales de Estados Unidos. La red comprende un entramado enormemente complejo de carreteras, infraestructuras dedicadas a la extracción y al refinado del petróleo para producir gasolina y la distribución de la misma a lo largo de las autopistas, así como industrias dedicadas a la fabricación de automóviles, y así sucesivamente. Si quisiéramos explicar el sistema con toda su complejidad, no nos preguntaríamos si los coches llevaron a la construcción de carreteras o si las carreteras llevaron a la fabricación de coches, ni se nos ocurriría pensar que el

## ASPECTOS BASICOS DEL METABOLISMO

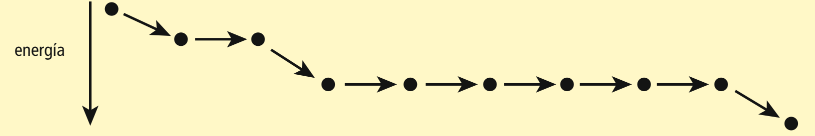
En un momento dado, en una célula tienen lugar cientos de reacciones químicas en las que unos reactivos se convierten en productos. En su mayoría, estas reacciones no se producirían sin la ayuda de enzimas: proteínas perfeccionadas durante la evolución para unirse a los reactivos (a menudo por parejas) con una especificidad asombrosa, facilitar la reacción entre ellos y liberar los productos.



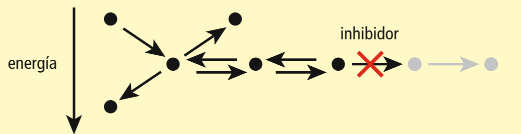

Las reacciones enzimáticas poseen una característica termodinámica común: la energía de los productos es menor que la de los reactivos. Dicho de otra forma, el flujo de las reacciones metabólicas avanza en la dirección del equilibrio. Las enzimas, como todos los catalizadores, no afectan a la posición del equilibrio, simplemente ayudan a que las especies químicas alcancen el equilibrio con mayor prontitud que en ausencia del catalizador (la velocidad de la reacción puede aumentar en millones de veces).




En las células, el metabolismo se organiza en rutas: secuencias de reacciones donde los productos de las reacciones catalizadas por unas enzimas son los reactivos utilizados por otras.




Las reacciones con una gran caída de energía se denominan irreversibles; en el interior de las células, tienen lugar en una única dirección. En numerosas reacciones celulares (como las horizontales de la figura superior), el cambio energético asociado a la reacción es casi nulo. Si el producto empieza a acumularse (quizá porque la actividad de una enzima que interviene en alguna etapa posterior de la ruta se encuentra bloqueada por un inhibidor), la reacción alcanzará el equilibrio operando en dirección opuesta, hasta que haya de nuevo un equilibrio entre reactivos y productos. El cambio en la concentración de los reactivos puede ir acompañado de un tráfico más intenso (flujo) hacia las reacciones que conducen hacia una ramificación de la ruta.




Tras 4000 millones de años de evolución, la célula ha acabado adquiriendo la extensa y sinuosa secuencia de reacciones que observamos en las células modernas. Las recoge el famoso mapa metabólico que elaboró en 1961 Donald Nicholson, de la Universidad de Leeds. Desde entonces se halla en constante actualización; puede encontrarse en las paredes de cualquier laboratorio del mundo.

¿Cómo llegó a formarse este sorprendente sistema? Escondida dentro de ese laberinto se encuentra una ruta cíclica, la "centralita" del metabolismo, que los autores consideran el fundamento de la vida misma, el lugar donde empezó todo.

VIAS METABOLICAS

OXALACETATO
CITRATO
ISOCITRATO
MALATO
2-OXO-GLUTARATO
FUMARATO
SUCCINIL-CoA
SUCCINATO
CoA

DONALD NICHOLSON, UNIVERSIDAD DE LEEDS/*American Scientist*

sistema se creó a partir un gigantesco proyecto de obras públicas que empezó de cero. Sería más fructífero considerar el estado de los transportes en la América preindustrial y preguntarse cómo los primitivos senderos, que sin duda hubo, se transformaron en líneas férreas y posteriormente en carreteras pavimentadas. Siguiendo esa línea argumental evolutiva acabaríamos explicando el sistema actual con toda su complejidad y sin tener que recurrir a sucesos aleatorios altamente improbables.

De la misma forma, la complejidad actual de la vida debería entenderse como el resultado de un proceso multietapa que comenzó con la química catalítica de pequeñas moléculas que intervenían en entramados sencillos (entramados que se conservan aún en las entrañas del metabolismo) y se perfeccionó mediante procesos de selección química; sólo después adoptaría las características de celularización e individualidad de los organismos que hacen posible la selección darwinista que los biólogos observan en la actualidad.

Nuestra tarea consiste en mirar a las autopistas modernas y determinar qué nos revelan sobre los senderos de a pie originales.

La robustez de la vida moderna hace que estas cuestiones resulten difíciles. El metabolismo que observamos hoy en día parece ser uno en el que la vida ha convergido y a cuyo alrededor se ha reorganizado tras sufrir cataclismos históricos: la oxigenización de la atmósfera al principio de la era paleoproterozoica, la emergencia de la multicelularidad, los cambios climáticos que han redefinido el ambiente, etcétera.

Para no confundir esta forma convergente con una forma hacia la cual "iría dirigida" la evolución, preferimos centrarnos en el mundo abiótico que precedió a la vida y preguntarnos ¿"qué es lo que falló" en ese mundo, para que se diesen los primeros pasos que condujeron hacia la vida? En otras palabras, ¿cuál fue el "problema" que la tierra abiótica "solucionó" mediante la aparición de la vida?

Otra analogía ilustra la cuestión. Imaginemos un magno estanque de agua situado en lo alto de una colina. Sabemos que hay un gran número de estados que presentan menor energía (cualquiera en el que el agua esté a una altura por debajo de la cima) y que son, por tanto, estados hacia los que el sistema tenderá a evolucionar a lo largo del tiempo. El "problema" al que se enfrenta el sistema consiste en cómo hacer que el agua pase de su estado inicial a cualquier otro estado de menor energía (cómo hacer que el agua fluya colina abajo). No tenemos que pensar que las leyes de la física están dirigidas hacia un fin concreto sino, más bien, que deciden entre

estados de mayor o menor energía, con una preferencia hacia los estados menos energéticos. ¿Podemos aplicar el mismo razonamiento a la química de la vida?

En el caso de una colina, no sólo entendemos que el agua fluye colina abajo, sino también muchas otras cosas sobre cómo lo hace. Las moléculas de agua no fluyen cuesta abajo siguiendo rutas aleatorias. En su lugar, el flujo de agua abre un canal en la ladera de la colina; crea enseguida un canal y contribuye al colapso del desequilibrio energético que impulsa el proceso. Si lo observamos de cerca, vemos que lo que realmente importa es la configuración del terreno en las proximidades de la cima de la colina, puesto que es allí donde comienza la canalización. Esta parte de la analogía resulta particularmente apropiada cuando consideramos las reacciones bioquímicas primitivas.

El "problema" es, pues, que el agua se halla inicialmente en un estado de energía elevada. La formación del canal "resuelve" el problema, al permitir que el agua discurra hacia un estado de energía menor. Además, la dinámica del sistema es tal, que una vez se ha establecido el canal, el flujo posterior lo refuerza y fortalece. En la naturaleza existen numerosos sistemas de canales de ese tipo: el relámpago, por ejemplo, aunque las fuerzas que lo conducen son de tipo eléctrico, no gravitatorio. (Cuando se forma un relámpago, se produce una separación de cargas positivas y negativas entre las nubes y el suelo. Esa separación ioniza los átomos del aire, creando un canal conductor a través del cual fluyen las cargas —el relámpago— de forma muy parecida al flujo del agua colina abajo).

Proponemos que la aparición de la vida en nuestro planeta fue resultado de la creación de un canal de ese tipo, salvo por el hecho de que el escenario era químico, no geológico. En el mundo abiótico de la Tierra primitiva, probablemente en un entorno excitado desde el punto de vista químico, se acumularon reservorios de energía: los electrones (junto con determinados iones clave) fueron acumulándose en la cima de colinas químicas. Esos electrones poseían, como el agua de nuestra metáfora, energía almacenada; el "problema" consistía en cómo librarse de ella. En palabras de Albert Szent-Gyorgi: "La vida no es sino un electrón buscando un lugar donde descansar".

Las moléculas de dióxido de carbono y de hidrógeno se producen en abundancia en ambientes geoquímicos comunes, como las fuentes hidrotermales profundas. La energía de ese sistema disminuye si los electrones de la molécula de hidrógeno "descienden por la colina", combinándose con los átomos del dióxido de carbono en una reacción química que produce agua y acetato (una molécula con dos átomos de carbono). Sin embargo, en el mundo abiótico esa reacción se produce de forma tan parsimoniosa, que los electrones de la molécula de hidrógeno se quedan atascados en la cima de la colina energética.

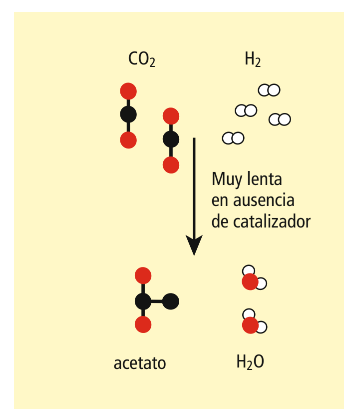
En ese caso, el problema que se resuelve mediante la aparición de la vida es conseguir que los electrones más energéticos desciendan de la cima de la colina química. Hazaña que se logra mediante el establecimiento de una serie de canales bioquímicos, donde cada uno contribuye al conjunto (pensemos en un reguero de agua que perfora múltiples canales en la colina). Las reacciones que generan esos canales implicarían intercambios químicos sencillos entre moléculas orgánicas de tamaño reducido.

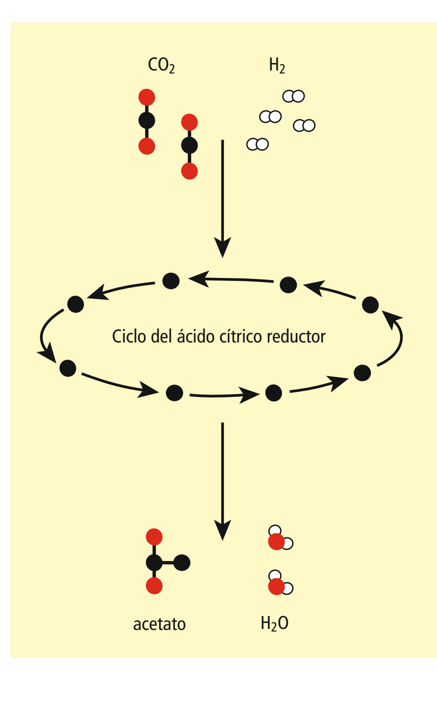
¿Cómo podemos trasladar ese argumento a un escenario que explique la aparición del primer ser vivo? Una forma de hacerlo sería mirar con detalle el esquema metabólico mostrado anteriormente, el diagrama que representa las reacciones químicas básicas de todos los sistemas vivos.

En el núcleo del metabolismo (el punto de partida de las rutas sintéticas de todas las biomoléculas) se halla un conjunto de reacciones simples: el ciclo del ácido cítrico (ciclo de los ácidos tricarboxílicos o ciclo de Krebs). En él hay ocho moléculas implicadas, todas ácidos carboxílicos (moléculas que contienen grupos —COO).

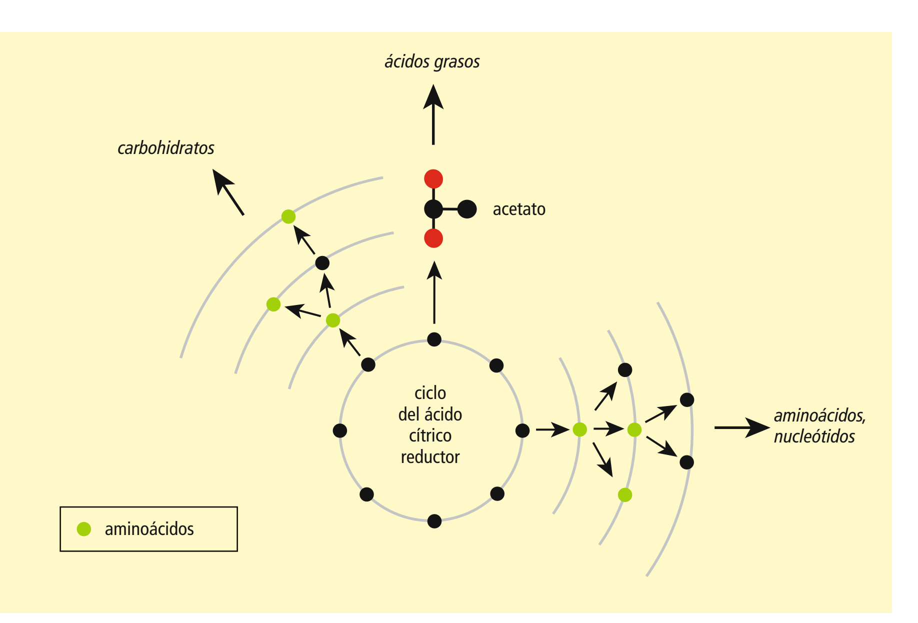
En la mayoría de las formas de vida actuales, el ciclo del ácido cítrico funciona mediante la descomposición de las moléculas orgánicas en dióxido de carbono y agua; se utiliza el oxígeno para producir energía para la célula y se "queman" esas moléculas como si fuesen combustibles. (Una molécula como la glucosa se descompone primero en moléculas de menor tamaño como el piruvato, que se incorpora luego al ciclo del ácido cítrico. La descomposición completa del piruvato para generar $CO_2$ y agua se ve facilitada por la transferencia de electrones de alta energía a ciertos cofactores que, en la célula moderna, transportan los electrones hacia otras reacciones.) Cuando el ciclo opera de esa forma, decimos que lo hace en su modo oxidativo.

El ciclo puede operar también en sentido opuesto: acepta energía (en forma de electrones energéticos) para construir macromoléculas a partir de otras de menor tamaño. Este es el modo reductor del ciclo. Si un organismo tiene acceso a electrones de energía elevada, como los que derivan de procesos geoquímicos, puede proliferar con el ciclo operando exclusivamente en modo reductor, quedando el modo oxidativo sin ninguna utilidad.




BARBARA AULICINO/*American Scientist*




**4. EL FAMOSO MAPA METABOLICO del recuadro "Aspectos básicos del metabolismo" se modificó en fecha reciente para mostrar el metabolismo de los quimioautótrofos (organismos que obtienen energía a partir de fuentes inorgánicas y sintetizan todos los compuestos necesarios a partir del $CO_2$). Al colocar las reacciones en círculos concéntricos se pone de manifiesto una ruta corta que genera productos biológicos esenciales.**

Una forma de considerar los dos modos operativos del ciclo es la siguiente. En modo oxidativo, se aporta una molécula orgánica y se obtiene energía química, dióxido de carbono y agua; en modo reductor, se aporta energía química y se obtiene una molécula de mayor complejidad.

Esa forma debió de ser la recorrida por el ciclo en la Tierra primitiva, pues al principio no había oxígeno molecular disponible para sustentar el modo oxidativo. Añádase que en la actualidad sigue operando así en determinados organismos anaerobios que parecen haber conservado este aspecto de la bioquímica ancestral. En modo reductor, el ciclo proporciona una vía para que los electrones de energía elevada desciendan por la pendiente química. Tal proceder guarda semejanza con la reacción del acetato, aunque termodinámicamente posible, muy lenta, pero con un entramado de moléculas pequeñas (el ciclo del ácido cítrico en modo reductor) que desempeñan una función intermediaria y aceleran la reacción.

En términos bioquímicos y termodinámicos, el ciclo del ácido cítrico en modo reductor (o algún precursor más sencillo) sería, por tanto, un buen candidato para definir el umbral de la vida primitiva (el punto en que el estanque lleno de agua, con energía potencial elevada, se fractura y empieza a perfilarse la ruta que conduce colina abajo). La lenta conversión no catalizada de dióxido de carbono e hidrógeno en acetato y agua se lleva a cabo conforme la energía y los reactivos se incorporan a un entramado primitivo de reacciones similar al actual ciclo del ácido cítrico en modo reductor.

En los mapas metabólicos de todos los organismos modernos, las pequeñas moléculas y reacciones del ciclo del ácido cítrico son el punto de partida de todas las rutas biosintéticas (todas las rutas comienzan a partir del ciclo del ácido cítrico). Sin embargo, en algunos organismos, las reacciones no forman una secuencia de reacciones cerrada (ciclo). Por ese motivo se sigue debatiendo si el primer sendero metabólico fue un ciclo.

Sin embargo, dado que sólo los ciclos pueden actuar como canales que se autoamplifican y puesto que en los organismos en los que no opera el ciclo cerrado se necesitan sutiles adaptaciones compensatorias, un ciclo primitivo del ácido cítrico en modo reductor debió de ser la ruta más probable que condujo de la geoquímica a la vida (el pequeño arroyo que se formó en lo alto de la colina energética y a través del cual se produjo la fuga termodinámica del estanque de energía). Entonces, ¿cómo surgió, a partir de este sencillo comienzo, la complejidad que observamos en la célula moderna?

Lo primero que debemos tener en cuenta es que el ciclo, por sí mismo, capta sólo una parte de la energía presente en el dióxido de carbono y el hidrógeno que entran en su seno. Al transformar el dióxido de carbono en acetato, el ciclo aprovecha sólo alrededor de un tercio de la energía disponible en los electrones. Mas ni siquiera en el núcleo profundo del metabolismo el ciclo se encuentra aislado. Su molécula de menor energía, el acetato, constituye el punto de partida para otras rutas que fabrican los lípidos esenciales que se utilizan en las membranas celulares, con lo que se aprovecha otro tercio de la energía de los electrones. Otras reacciones, como las que generan metano, captan la energía restante disponible, aunque el metano es un gas y, por tanto, un producto de desecho, a diferencia de las moléculas anteriores de la ruta, que son constituyentes de la biomasa.

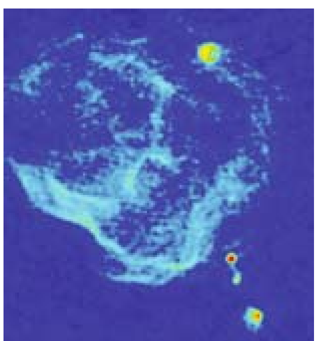
## Comienza la selección

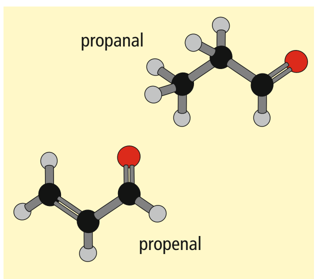
Existe una diferencia fundamental entre la manera en que los sistemas de reacciones químicas podrían haber funcionado antes de la aparición de las primeras moléculas autorreplicantes y la forma de operar ahora que ya se han desarrollado los sistemas autorreplicantes.

Al principio, la única fuente potencial de orden habrían sido los entramados de reacciones químicas que operaban según las leyes de la física y la química. Sin embargo, tras la aparición de moléculas con capacidad para replicarse con mayor o menor independencia, como el ARN, la evolución podría haber seguido según las leyes de la selección natural, donde el éxito de las generaciones posteriores dependía de propiedades adaptativas.

BARBARA AULICINO Y MORGAN RYAN/*American Scientist*








**5. EL PROGRAMA PRIMOS (de "Prebiotic Interstellar Molecule Survey"), que busca moléculas prebióticas interestelares, se ha centrado en Sagitario B2(N). En esta nube, próxima al centro de nuestra galaxia (*izquierda*, imagen obtenida con un radiotelescopio *arriba a la derecha*) se ha detectado el rastro, en forma de ondas de radio, de un gran número de moléculas orgánicas (*abajo, derecha*). Allí donde tiene lugar la química del carbono, ¿está el metabolismo detrás?**



Cuándo y cómo tuvo lugar esa transición siguen siendo cuestiones abiertas, pero el hecho de que tuvo lugar está claro. En otras palabras: antes de la aparición de las primeras moléculas autorreplicantes o de las primeras agrupaciones de moléculas —recordemos que éstas podían o no haber estado en el interior de las células—, lo que importaba era la persistencia del entramado químico; tras la aparición de un sistema de ese tipo, la selección natural adoptó su aspecto más familiar, escogiendo entre "individuos" reproductores rivales.

Tras el comienzo de la selección natural, entrarían en escena, mediante accidentes aleatorios, sistemas con químicas ligeramente distintas. El acetato, por ejemplo, puede utilizarse de dos maneras para fabricar moléculas lipídicas; la división de los principales dominios de la vida se hace, en parte, en función de la clase de lípidos producidos y del modo en que se utilizan. La producción de metano con fines puramente energéticos podría haber sido un proceso primordial o podría haberse integrado en el metabolismo en una etapa posterior, más compleja (otra cuestión seriamente debatida entre quienes investigan las ramas más profundas del árbol de la vida).

La pauta importante que merece atención es que el ciclo primordial proporciona la estabilidad y los materiales de arranque que permiten la etapa de la selección. Creemos que fue durante la transición hacia esa etapa cuando la geoquímica empezó a adoptar las características de replicación y de selección que Darwin reconoció distintivas de la vida. Una vez comenzada una era de ese tipo, podían mantenerse la complejidad y la diversidad necesarias para explorar mejoras: en eficiencia, en adaptación al entorno geológico o en la división del trabajo en el seno de sistemas comunitarios.

Se repitió la misma pauta cuando el ambiente se vio alterado por la acumulación de una toxina destructiva (oxígeno), generada por organismos primordiales como producto de desecho. A medida que se adaptaban, los organismos no abandonaron el ciclo reductor del ácido cítrico, que creemos que fue el único fundamento de la biosíntesis. Antes bien, adquirieron la facultad de hacer que el ciclo funcionara en sentido contrario, extrayendo energía a partir de la descomposición de moléculas similares a las que el ciclo producía con anterioridad.

La función del ciclo del ácido cítrico como fundamento de la complejidad no se aplica sólo a las adaptaciones posteriores que experimentaron los organismos sometidos a la selección; se observa incluso en el seno de la estructura química del núcleo metabólico. Para comprender mejor este punto, rehagamos el diagrama del metabolismo actual, elaborado por Nicholson.

El esquema original de Nicholson se desarrolló para describir el metabolismo humano; se amplió de forma gradual para incorporar la compleja maraña química de la que dependemos los humanos. En fecha reciente, uno de los autores (Morowitz) y Vijay Srinivasan simplificaron el esquema de Nicholson, apoyados en pruebas microbiológicas: redujeron los módulos complejos y los dominios metabólicos a un núcleo mínimo común, el entramado de reacciones necesario y suficiente para formar un sistema vivo.

En el interior de ese esquema nuclear, dispusimos las rutas a modo de capas construidas

## Los autores

**James Trefil** está en posesión de la cátedra Clarence J. Robinson de física en la Universidad George Mason. **Harold Morowitz** es catedrático Clarence J. Robinson de biología y filosofía natural en la Universidad George Mason. **Eric Smith** es catedrático del Instituto Santa Fe.

en torno a los precursores del ciclo del ácido cítrico. La capa más interna contiene las moléculas que se forman a partir de intermediarios del ciclo mediante una reacción química; la capa siguiente contiene las moléculas que se fabrican mediante dos reacciones, y así sucesivamente. (Una vez superadas las primeras capas, el recuento se hace ambiguo ya que, con frecuencia, las reacciones utilizan moléculas que son, a su vez, los productos de capas más internas.) A partir de esta estructura en capas, puede observarse la cascada química que contenía las primeras etapas de la evolución de la vida.

El núcleo primordial del esquema es más sencillo que el complicado mapa que resulta de la combinación de los organismos actuales. Sin embargo, desde el punto de vista biosintético, no es mucho más simple: contiene los módulos principales de los azúcares, lípidos, aminoácidos y ácidos nucleicos. Hemos propuesto que fue, al menos a grandes rasgos, la agencia de selección química durante una época que precedió a la selección natural de organismos genuinos.

De ser así, ello tendría profundas repercusiones filosóficas ¿Deberíamos considerar que la historia de la vida es el resultado de principios físicos predecibles o bien fruto del azar? De hecho, estamos afirmando que la vida surgirá en cualquier planeta que reproduzca el ambiente y las condiciones geológicas de la Tierra primitiva y que aparecerá para resolver un problema como el del "electrón atascado". La visión popular actual de que la vida compleja deriva de una suerte de "accidente congelado" fue expuesta en el clásico libro de Jacques Monod *El azar y la necesidad* (1970).

Nosotros defendemos lo contrario, al menos para una parte de la arquitectura química básica. (Cabe resaltar que Monod estudió sistemas reguladores; en el campo que dominaba, reconocemos la importancia del azar, aunque creemos que lo defendió en términos demasiado generales.) El mecanismo que postulamos sugiere que la vida está esparcida por el universo y que puede desarrollarse en cualquier planeta cuya química se parezca a la de la Tierra primitiva.

La visión de la vida originándose como un entramado de reacciones químicas sencillas requerirá numerosas comprobaciones antes de ser adoptada por la comunidad científica. Destacamos dos áreas sobre las que se están llevando a cabo investigaciones: el desarrollo teórico de la mecánica estadística en estado de no-equilibrio y la reproducción experimental de las primeras reacciones químicas no enzimáticas que condujeron a la vida moderna.

Desde el punto de vista teórico, si aplicamos la termodinámica clásica en estado de

equilibrio a los sistemas vivos llegamos a una paradoja. Estos poseen una entropía baja, lo que los convierte en algo muy improbable desde el punto de vista de la termodinámica del equilibrio. El problema básico estriba en que el desarrollo teórico de la termodinámica clásica se ha centrado en sistemas en equilibrio (sistemas que no cambian a lo largo del tiempo) o en sistemas cuyo cambio se produce a través de sucesivos estados de equilibrio infinitésimamente distintos. Lo que hace falta, por tanto, es ampliar la termodinámica para que pueda aplicarse a sistemas que se mantienen lejos del equilibrio gracias al flujo de energía.

E. T. Jaynes sugirió a mediados del siglo xx un enfoque prometedor. Se percató de que la información (y, por tanto, la entropía) no guardaba relación sólo con los estados, sino también con el historial de cambios, que puede incluir flujos canalizados del tipo que hemos venido analizando. Técnicamente, uno no puede hablar sobre la entropía "de un estado" si éste se halla enmarcado en un contexto que depende de un proceso de cambio; sólo podemos esperar que se maximice la entropía del proceso completo.

Volviendo a nuestro estanque en lo alto de una colina, no existe una entropía aparte para el estanque; se trata sólo de una aproximación. Hay, sin embargo, una entropía para las rutas de cambio que incluyen el estanque, el canal, la construcción y la relajación.

En un sistema sencillo, el establecimiento de un canal puede verse como una transición de fase, similar a la congelación de un cubito de hielo o, utilizando una analogía matemática más precisa, la formación de un imán a partir de hierro fundido (la transición de fase tiene lugar conforme el metal se enfría y los dipolos magnéticos atómicos se alinean en la misma dirección, un estado que paradójicamente resulta más ordenado). La entropía total del proceso se maximizará en el sistema, aun cuando no lo haga la entropía asociada al "estado" del canal, con lo que desaparece la paradoja.

Los estudios sobre esta cuestión fundamental se centran hoy en el hecho de que el sustrato químico de los sistemas vivos entraña mayor complejidad que el de los sencillos sistemas físicos que se han examinado hasta el momento. Una nueva línea de investigación se funda en el desarrollo de pequeñas moléculas catalizadoras en entramados cooperativos de complejidad creciente. Hay esperanzas de que, cuando se tenga una nueva teoría, veremos la formación de la vida como un resultado inevitable de la termodinámica básica, al igual que la congelación de cubitos de hielo o la formación de imanes.

Desde el punto de vista experimental, algunos investigadores, entre ellos George Cody, de la Institución Carnegie de Washington D.C., se afanan por determinar las reglas básicas de la química orgánica en los ambientes exóticos que podrían haber resultado decisivos para el origen de la vida. Cody ha estudiado las interacciones orgánicas que tienen lugar en el rango de temperaturas y presiones que se dan en las fuentes hidrotermales profundas. Mike Russell, del Laboratorio de Propulsión de Reactores en Pasadena, está construyendo una gran cámara que reproduce la geoquímica de esos ambientes. Shelley Copley, de la Universidad de Colorado en Boulder, ha investigado la química intermedia que conduce al sistema de codificación genética actual, basado en ácidos nucleicos y proteínas, con un ojo puesto en la resolución del problema del huevo y la gallina.

Esa gavilla de experimentos representa un importante cambio paradigmático en cuanto a la jerarquía que operaba en el "mundo de ARN": en vez de imaginar que unas pocas macromoléculas de ARN controlan la adaptación de un entramado pasivo de reacciones entre moléculas de tamaño pequeño (control de arriba abajo), Copley supone que entramados enteros de moléculas intermedias se apoyan entre sí en el camino hacia la complejidad. En este montaje experimental, entramados de pequeños aminoácidos y nucleótidos de ARN sintetizados al azar se ayudan entre sí durante su formación, polimerización y evolución de la actividad catalítica. Ambos tipos de moléculas crecen juntas. La complejidad, la adaptación y el control se distribuyen en ese tipo de entramados, en vez de hallarse concentrados en determinada especie molecular o en un tipo de reacción.

Resulta muy probable que este modelo del control distribuido se convierta en el arquetipo en torno al cual se desarrolle la hipótesis de "primero el metabolismo" para convertirse en una teoría viable. Esperamos con avidez la llegada de más experimentos como éstos para explorar las múltiples facetas de la organización de los sistemas de moléculas pequeñas.

Sin embargo, en un sentido más amplio, el futuro del programa experimental asociado a la filosofía de "primero el metabolismo" está ligado al desarrollo de la teoría, guiada por los resultados experimentales. Esperamos que la interacción entre teoría y experimentación, tan familiar para los historiadores de la ciencia, dé lugar a una teoría que revele los principios físicos que condujeron al desarrollo de la vida y, por tanto, nos permita recrear la vida en el laboratorio.

## Bibliografía complementaria


A THEORY OF BIOCHEMICAL ORGANIZATION, METABOLIC PATHWAYS, AND EVOLUTION. H. J. Morowitz en *Complexity*, vol. 4, págs. 39-53; 1999.

UNIVERSALITY IN INTERMEDIARY METABOLISM. E. Smith y H. J. Morowitz en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*., vol. 101, págs. 13.168-13.173; 2004.

ENERGY FLOW AND THE ORGANIZATION OF LIFE. H. J. Morowitz y E. Smith en *Complexity*, vol. 13, págs. 51-59; 2007.

THE CANONICAL NETWORK OF AUTOTROPHIC INTERMEDIARY METABOLISM. V. Srinivasan y H. J. Morowitz en *Biological Bulletin*, vol. 216, págs. 126-130; 2009.

# LA CIENCIA DE LAS BURBUJAS

La peor crisis económica desde la Gran Depresión ha provocado una reevaluación del funcionamiento de los mercados financieros y del modo en que los individuos toman decisiones relativas al dinero

**Gary Stix**

### CONCEPTOS BASICOS

- El colapso financiero mundial ha promovido un nuevo análisis de las causas por las que a veces los mercados se recalientan y posteriormente se desploman.
- El estallido de las *punto com* y la subsiguiente crisis hipotecaria y crediticia ponen de manifiesto que determinados fenómenos psicológicos nublan el razonamiento al tomar decisiones sobre inversiones. Entender tales comportamientos contribuye a aclarar el origen de los auges y los colapsos económicos.
- Los nuevos modelos de dinámica del mercado buscan prevenir los desplomes financieros reflejando de modo más preciso el funcionamiento de los mercados. Entre tanto, una regulación más inteligente puede guiar amablemente al comprador de inmuebles o al ahorrador jubilado para que no adopte decisiones erróneas.

Tiene todos los ingredientes de una escena de película clásica de serie B. Un pistolero apunta a la frente de la víctima y la pantalla se vela antes de oírse el estruendo de un disparo. Un especialista forense que trazara la trayectoria de la bala observaría que el proyectil había atravesado la corteza prefrontal del cerebro, zona crucial para la toma de decisiones.

No debería resultar sorprendente que las pocas personas que sobreviven a las lesiones, por lo general mortales, en esa región del cerebro sufran alteraciones radicales de la personalidad. El de Phineas Gage, ferroviario del siglo XIX, es uno de los casos más citados de la historia de la neurología: una barra de hierro le atravesó la corteza prefrontal, y aunque vivió para contarlo, nunca más volvió a tomar decisiones sensatas. Los adictos a la cocaína pueden infligirse daños similares. La disfunción resultante llega a hacer que hasta los adictos que han abandonado el hábito anhelen la droga cada vez que los retumbantes bajos de una pieza tecno les evocan los momentos en que estaban bajo los efectos de la cocaína.

Pero también personas que no consumen drogas ilegales o reciben un impacto en la cabeza deben enfrentarse al hecho de que algunas decisiones generadas en los lóbulos frontales les encaminan a tomar decisiones erróneas. De un área específica dentro de la corteza prefrontal, la corteza prefrontal ventromedial (CPFVM), se piensa que podría haber contribuido a la crisis económica que está sacudiendo el mundo.

La CPFVM es una zona clave para la generación de la “ilusión monetaria”. La ilusión consiste en hacer caso omiso de información obvia acerca de las distorsiones que la inflación causa en una compra y, en un impulso irracional, valorar exageradamente un bien. La ilusión monetaria puede convencer a los posibles compradores de que una casa es siempre una óptima inversión, movidos por la errónea percepción de que los precios suben inexorablemente. Robert J. Schiller, profesor de economía de la Universidad de Yale, sostiene que la lógica errónea de la ilusión monetaria contribuyó a la burbuja inmobiliaria: “Se tiende a recordar el precio que se pagó por una casa hace muchos años, pero no se recuerdan con idéntica fidelidad los precios de otros bienes en esa época, y así se llega a la conclusión equivocada de que los precios de los inmuebles han subido más que los de otros bienes. Se tiene entonces una impresión exagerada de las posibilidades de rentabilizar la inversión en viviendas”.

Durante décadas, los economistas han discutido acerca de la posibilidad de que la ilusión monetaria y, en términos más generales, la influencia de la irracionalidad en las transacciones económicas sean en sí mismas ficticias. Milton Friedman, teórico del monetarismo, sostenía que los consumidores y los empresarios no se dejan engañar y que, como seres racionales que son, tienen en cuenta la inflación cuando realizan compras o pagan salarios. Dicho de otro modo, las personas juzgan muy bien el valor real de un bien. Pero las ideas de los economistas conductuales, que estudian el papel que desempeña la psicología al tomar decisiones económicas, están ganando más predicamento en la actualidad a medida

# Y LOS COLAPSOS



que científicos de diversas disciplinas se esfuerzan por entender por qué la economía mundial ha caído de forma tan contundente y rápida.

Sus ideas se ven, además, apoyadas por los neurólogos que toman imágenes internas de la CPFVM y otras áreas del cerebro. En concreto, un experimento difundido en marzo en las Actas de la Academia Nacional de las Ciencias de EE.UU. por investigadores de la Universidad de Bonn y del Instituto de Tecnología de California demostró que algunos circuitos cerebrales que intervienen en la toma de decisiones mostraban indicios de ilusión monetaria en imágenes obtenidas mediante un escáner cerebral. Una parte de la CPFVM se iluminaba en los sujetos que conseguían una mayor cantidad de dinero, aun cuando el poder adquisitivo relativo de ese importe no había variado al haber aumentado también los precios.

La iluminación de la zona cerebral en cuestión, situada detrás de la frente, ligada a una percepción equivocada del dinero, constituye sólo un ejemplo del creciente refinamiento de una línea de investigación que ya ha permitido descubrir centros cerebrales involucrados en las motivaciones más primarias de los inversores, como el miedo (la amígdala) y la codicia (el núcleo accumbens, posiblemente también la zona donde se determina el deseo sexual, lo que quizá no sorprenda).

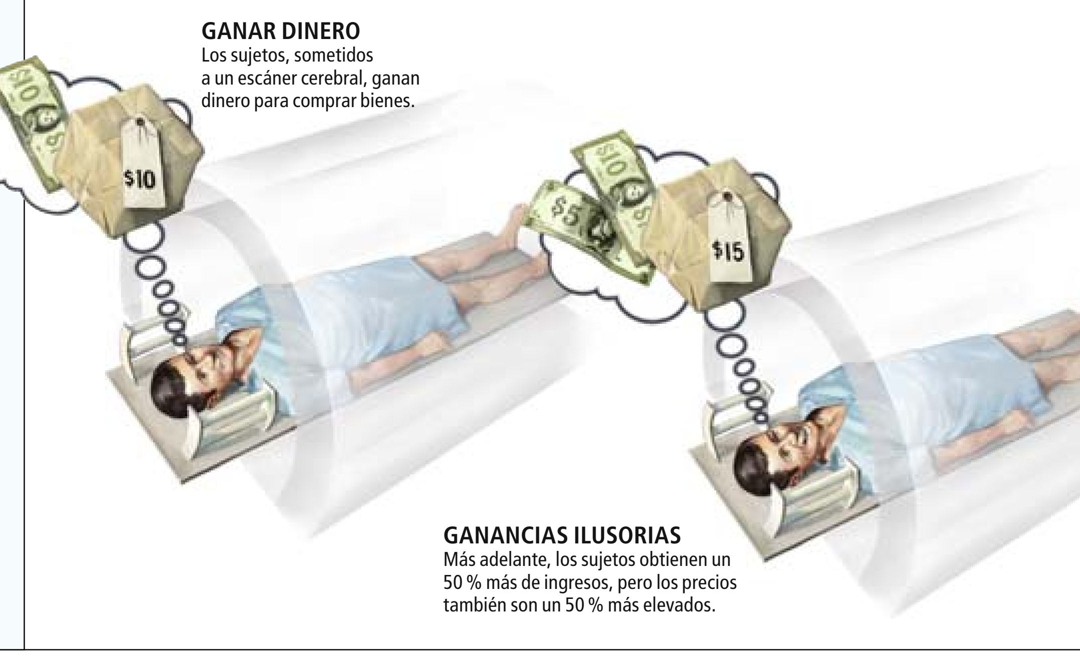
La colaboración entre las técnicas más modernas de obtención de

AARON GOODMAN

# ¿ENTIENDE USTED EL DINERO (REAL)?

Un fenómeno psicológico llamado ilusión monetaria puede haber contribuido a la burbuja inmobiliaria en el origen de la crisis económica mundial actual. Esta ilusión es la confusión resultante cuando no se es capaz de reconocer los efectos de la inflación en el valor real de una moneda. Los aumentos del precio de la casa o del salario de una persona, por ejemplo, pueden convertirse en una ilusión, una vez dichos precios se ajustan a la inflación.

Un experimento reciente llevado a cabo por investigadores de la Universidad de Bonn y el Instituto de Tecnología de California (*derecha*) localizó el origen de la ilusión monetaria en un centro de toma de decisiones en el cerebro. La corteza prefrontal ventromedial se activaba cuando se presentaba a los sujetos una ganancia ilusoria.




**GANAR DINERO**
Los sujetos, sometidos a un escáner cerebral, ganan dinero para comprar bienes.

**GANANCIAS ILUSORIAS**
Más adelante, los sujetos obtienen un 50 % más de ingresos, pero los precios también son un 50 % más elevados.

imágenes cerebrales, por un lado, y la psicología y economía conductuales, por otro, ha comenzado a dar pistas sobre el modo en que los individuos y, a mayor escala, las economías en su conjunto pueden tomar una senda errónea en cuestiones monetarias. Juntas, estas disciplinas intentan descubrir por qué un sistema económico, construido con medidas de protección formales contra el colapso, puede experimentar crisis de tan enorme alcance. Parte de estas investigaciones se está empleando como guía de actuación por la administración Obama en su intento de estabilizar la banca y el sector inmobiliario.

**La fusión de las técnicas de neuroimagen con la psicología y la economía conductuales ha empezado a ofrecer pistas sobre el modo en que los individuos y, a mayor escala, las economías en su conjunto pueden tomar una senda errónea en cuestiones monetarias.**

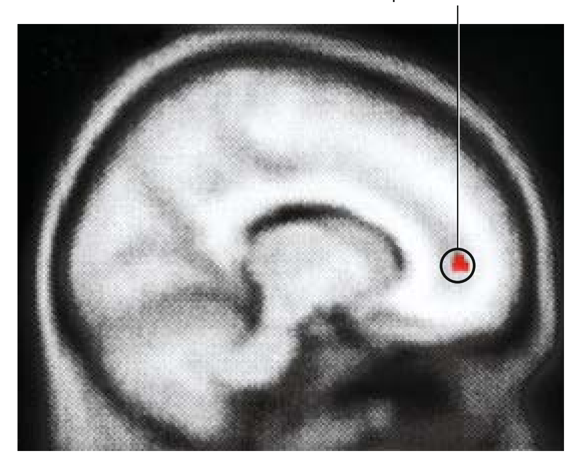
## La ilusión de la racionalidad

Las ideas conductuales, que están atrayendo una creciente atención en la actualidad, se oponen a algunos principios de la teoría económica moderna, incluyendo la tesis de que cada comprador y vendedor constituye un ejemplar de *Homo economicus*, un ser puramente racional, motivado por el interés propio. "Bajo cualquier condición, en la economía clásica el hombre es un autómata capaz de razonar de forma objetiva", escribe el historiador financiero Peter Bernstein.

Otro de los principios centrales de la doctrina racionalista es la hipótesis del mercado eficiente, que sostiene que toda la información pasada y actual sobre un bien se halla reflejada en su precio. Así, el mercado alcanza un punto de equilibrio entre compradores y vendedores justo en el precio "correcto". Lo único que puede alterar ese equilibrio entre la oferta y la demanda es un *shock* externo, como el generado, por ejemplo, por una modificación inesperada de los precios por parte de un cártel petrolero.

Así pues, de acuerdo con los principios racionalistas clásicos, el sistema financiero dispone de una dinámica propia para mantenerse en equilibrio. Por consiguiente, es imposible que la dinámica interna del mercado conduzca a un ciclo de retroalimentación en el que el aumento de un precio se transmita sucesivamente a los precios de otros bienes, generando una burbuja y un posterior cambio en la tendencia del ciclo económico que conlleve una desestabilización capaz de paralizar toda una economía.

Una interpretación estricta de la hipótesis del mercado eficiente implicaría que el riesgo de que la burbuja estalle se vería reflejado en los precios de mercado existentes: el precio de los inmuebles y de las hipotecas de alto riesgo (*subprime*) que se empaquetaron en lo que ahora se denominan "activos tóxicos". Pero si ese fuera el caso y los mercados funcionasen de forma eficiente, ¿cómo pueden caer los precios de modo tan precipitado? El propio ex presidente de la Reserva Federal, Alan Greenspan, se mostró desconcertado ante el fracaso de los postulados de la teoría clásica. Defensor a ultranza del concepto de los mercados eficientes, Greenspan manifestó lo siguiente ante una comisión del Congreso estadounidense en octubre de 2008: "Quienes confiábamos en que, por su propio interés, las entidades crediticias protegerían los valores de sus accio-




**EL CEREBRO REACCIONA**
La activación de una región del cerebro involucrada en la toma de decisiones, la corteza prefrontal ventromedial, era más elevada en los sujetos que percibían irracionalmente un mayor ingreso como ganancia, incluso si el poder adquisitivo no había cambiado.

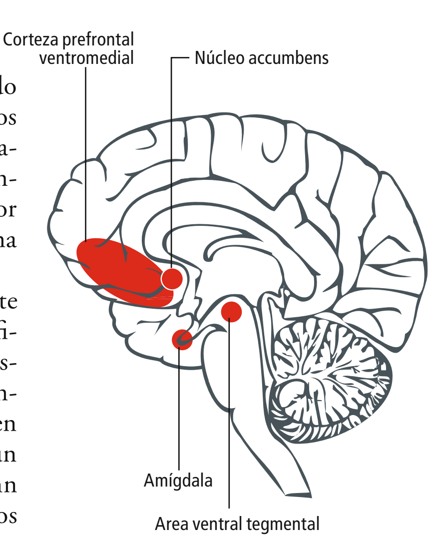
nistas, especialmente yo, nos encontramos en un estado de atónita incredulidad".

## Espíritus animales

Los economistas conductuales que buscan acotar qué factores psicológicos conducen a las burbujas y a los desequilibrios graves del mercado son herederos intelectuales de los psicólogos Amos Tversky y Daniel Kahneman. En el decenio de los setenta, ambos emprendieron estudios que desafiaban el concepto de los agentes financieros como robots racionales. Kahneman ganó el premio Nobel de economía en 2002 por su trabajo; seguramente Tversky lo hubiera obtenido también de haber estado vivo. El trabajo pionero de los dos científicos abordó la ilusión monetaria y otras debilidades psicológicas, tales como nuestra tendencia a sentir más tristeza por una pérdida, por ejemplo de 1000 dólares, que alegría por una ganancia del mismo importe.

Los impulsos psicológicos, normalmente irracionales, que subyacen a las burbujas financieras y al grave desplome posterior constituyen el tema central de la economía conductual. Robert J. Shiller, una autoridad en el ámbito, cita los "espíritus animales" —un concepto acuñado por el economista John Maynard Keynes— como explicación. Los ciclos económicos, es decir, los habituales períodos de recesión y auge en la actividad económica, dependen de un sentido básico de confianza por parte de las empresas y por parte de los consumidores, para que unas y otros colaboren entre sí cada día en las transacciones económicas cotidianas.

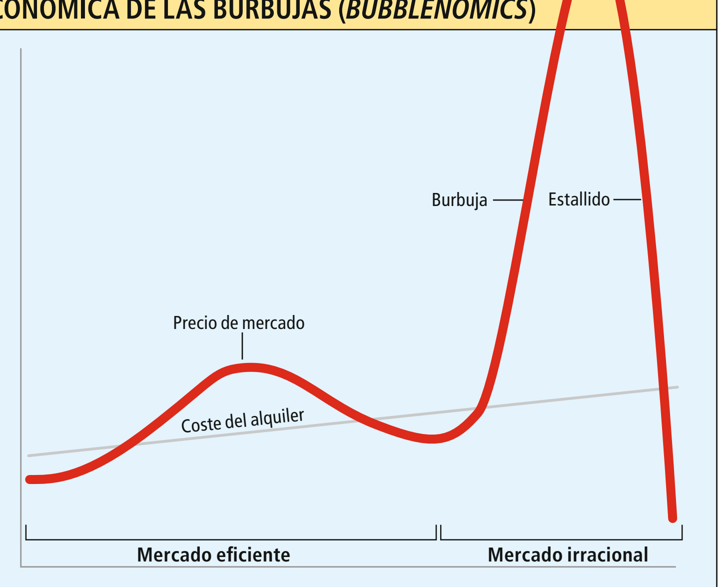
La base para la confianza, sin embargo, no siempre se construye sobre juicios racionales. Los espíritus animales —esas corazonadas de que, efectivamente, ha llegado el momento de comprar una casa o esas acciones que a partir de ahora se revalorizarán— llevan a la gente a sentir un exceso de confianza y a tomar decisiones apresuradas en épocas de bonanza. Unos sentimientos que pueden transformarse rápidamente en pánico a medida que aumenta la ansiedad y el mercado avanza en la dirección contraria. La toma de decisiones guiada por las emociones complementa los prejuicios cognitivos —la incapacidad de la ilusión monetaria para tener en cuenta la inflación, por ejemplo— que conducen a una lógica inversora deficiente.




**1. LAS AREAS DEL CEREBRO que se activan en respuesta a una recompensa o riesgo incluyen, entre otras, las mostradas arriba.**

### LOS MERCADOS EFICIENTES FRENTE A LA TEORIA ECONOMICA DE LAS BURBUJAS (*BUBBLENOMICS*)

La teoría económica clásica no considera que la irracionalidad de las personas repercuta en sus decisiones financieras. Una piedra angular de la ortodoxia financiera, la hipótesis de la eficiencia del mercado, sostiene que la mayoría de los individuos realizarán una compra cuando un bien (una casa) se halle infravalorado y se abstendrán del gasto si el bien se vuelve demasiado caro (*lado izquierdo del gráfico*). Pero la teoría clásica tiene grandes dificultades para explicar las burbujas económicas, en las que los precios se elevan muy por encima del valor real del bien, ya sea una casa o un título financiero. En cambio, las teorías económicas conductuales, que se centran en la psicología de las finanzas, predicen que, a veces, la emoción y el pensamiento irracional predominarán en las decisiones, lo que conducirá a grandes masas de personas a gastar cada vez más en las inversiones, en vez de reconocer que están pagando un precio excesivo. Al final, acabarán huyendo en estampida del mercado, víctimas del pánico y precipitando un colapso (*derecha*).




MELISSA THOMAS (*gráfica e ilustración del cerebro*); "THE MEDIAL PREFRONTAL CORTEX EXHIBITS MONEY ILLUSION", POR BERND WEBERA, ANTONIO RANGELB, MATTHIAS WIBRALC Y ARMIN FALKC, EN *PNAS*, VOL. 106, N.º 13; 31 DE MARZO DE 2009 (*escáner de cerebro*)

# NUESTROS PREJUICIOS INTERNOS

El cerebro tiene dos sistemas para elaborar juicios acerca del dinero y de una amplia variedad de otras decisiones que nos permiten desenvolvernos en nuestras vidas cotidianas. Un sistema es intuitivo, el otro racional. El sistema intuitivo produce errores en el razonamiento, los prejuicios cognitivos, que pueden causarnos problemas cuando se abordan asuntos financieros. A continuación se citan algunos de los errores básicos al utilizar dinero que han sido descritos por los economistas conductuales.




EXCESO DE CONFIANZA: Sobrevaloramos de forma sistemática nuestra habilidad para hacer de todo, desde conducir un coche hasta invertir en propiedades o la bolsa.




COMPORTAMIENTO GREGARIO: La tendencia a seguir a la masa puede ocasionar que un gran número de inversores compartan la misma opinión acerca de un activo financiero, impulsando los precios al alza o a la baja.

MATT COLLINS

**El apetito por asumir riesgos con el dinero varía en respuesta a señales emocionales, incluso si son sutiles, lo cual socava el mito del inversor frío y calculador.**

La importancia tanto de las emociones como de los prejuicios cognitivos para explicar la crisis mundial se pone de manifiesto en la concatenación de sucesos que, a lo largo de los últimos 10 años, ha acabado dejando al sistema financiero en una situación tambaleante. El espíritu animal propulsó las acciones de Internet hasta unas cotas insostenibles durante el auge de las *punto com*, y del mismo modo provocó el desplome de sus cotizaciones unos años después. También estuvo presente cuando algunos prestamistas irresponsables se aprovecharon de los bajos tipos de interés para ofrecer hipotecas de interés variable a prestatarios de alto riesgo o *subprime*.

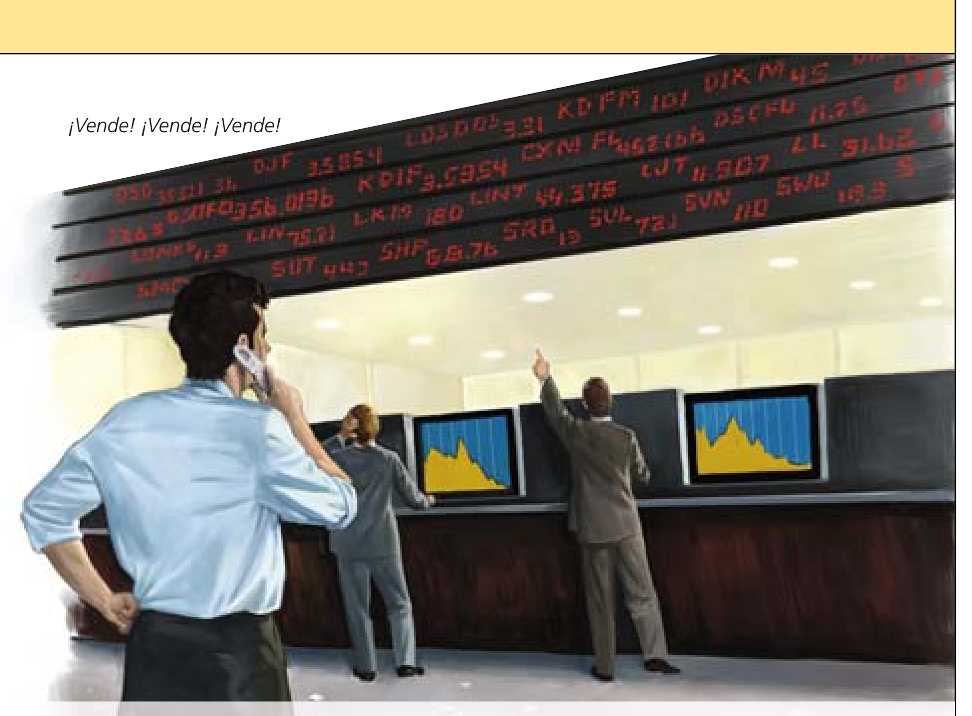
En esa época prevaleció un fenómeno parecido a la ilusión monetaria: los prestatarios de las hipotecas fueron incapaces de calcular qué pasaría en caso de una subida de los tipos de interés, que es exactamente lo que ocurrió a mediados de la década, causando ingentes cantidades de ejecuciones hipotecarias e impagos. Las hipotecas titulizadas, es decir, la deuda de cientos de miles de propietarios de inmuebles empaquetada por los bancos en valores negociables vendidos posteriormente a terceros, perdieron la mayor parte de su valor. Los bancos fueron testigos de la disminución de su capital para préstamos. El crédito, el elemento vital del capitalismo, desapareció, provocando una crisis mundial.

## Reglas empíricas

Tanto la economía conductual como la disciplina de las finanzas conductuales, derivada de la primera aunque perteneciente de forma más directa al ámbito de las inversiones, han comenzado a aclarar con más detalle de qué modo los fenómenos psicológicos peculiares que el dinero produce en los seres humanos pueden ayudar a explicar la actual crisis. La ilusión monetaria constituye sólo un ejemplo de los procesos de pensamiento irracional estudiados por los economistas.

La heurística, es decir, las reglas empíricas que necesitamos para reaccionar con rapidez en una crisis, constituye probablemente un legado de nuestros antepasados del paleolítico. Para nuestros ancestros, el razonamiento comedido no tenía ninguna utilidad cuando se enfrentaban con un mamut. Cuando no tenemos delante un animal salvaje, la heurística puede generar en ocasiones prejuicios cognitivos.

Los economistas conductuales han identificado diversos prejuicios, algunos de gran importancia para las burbujas económicas. En los sesgos o prejuicios de confirmación, las personas ponderan en exceso la información que confirma su punto de vista. Véase como ejemplo el enorme aumento de los precios de la vivienda a medida que se iba dando por sentado que apostar a que el precio de los inmuebles seguiría subiendo era apostar sobre seguro. El comportamiento gregario que así se




PREJUICIO DE LA DISPONIBILIDAD: El recuerdo de los hechos recientes y otras consideraciones que vienen rápidamente a la mente pueden convertirse en preocupaciones que provoquen que un inversor se centre en resultados a corto plazo y que tal vez venda presa del pánico, si el mercado baja.

creó hizo que un gran número de personas compartieran esa creencia.

Los prejuicios de disponibilidad, que pueden motivar decisiones basadas en la información más reciente, es una de las razones por la que algunos periodistas rehuyeron del uso de la palabra *crash* en el otoño de 2008, en un intento vano de evitar un estado de pánico generalizado. Los prejuicios de retrospectiva, el sentimiento de que un hecho ya se conocía desde un buen comienzo, pueden observarse con posterioridad al desplome del mercado: los inversores, los propietarios de casas y los economistas reconocen ahora que las señales de la formación de una burbuja eran evidentes, a pesar de haber contribuido activamente al encarecimiento de los inmuebles.

La economía neuronal, una disciplina emparentada con la economía conductual, utiliza imágenes por resonancia magnética y otras técnicas de formación de imágenes del cerebro para dilucidar si los prejuicios idiosincrásicos son invenciones de la imaginación académica o si realmente operan en la mente humana. Las imágenes han confirmado la ilusión monetaria. Sin embargo, se están estudiando también otras cuestiones; por ejemplo, si se activan los centros de recompensa y arrepentimiento en el cerebro por el hecho de hablar acerca del dinero, verlo o simplemente pensar en él.

En marzo, en la reunión anual de la Sociedad para la Neurociencia Cognitiva, celebrada en San Francisco, Julie L. Hall, doctorando de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, presentó un trabajo de investigación que mostraba que nuestra voluntad de asumir riesgos con el dinero cambia en respuesta incluso a señales emocionales sutiles. Esta conclusión socava una vez más el mito del inversor frío y calculador. En el experimento, 24 participantes —12 hombres y 12 mujeres— vieron fotografías de rostros alegres, enfadados y neutrales. Después de haber observado las caras alegres, los "inversores" del estudio presentaron una mayor activación en el núcleo accumbens, un centro de recompensa de nuestro cerebro; de forma sistemática invirtieron más en acciones de mayor riesgo, en vez de decantarse por la seguridad relativa de los bonos.

**Algunos economistas han empezado a adoptar ideas de la teoría evolucionista para representar mejor la manera en que los mercados pasan de situaciones de placidez a estados de turbulencia, y cómo algunos inversores sobreviven mientras otros llegan a desaparecer.**

Los rostros de felicidad fueron una presencia constante durante el *boom* inmobiliario de esta década. El semblante sonriente y el discurso optimista de Carleton H. Sheets, presentador de una teletienda inmobiliaria en la televisión norteamericana, prometían fortunas a las personas que carecían de dinero, crédito o experiencia previa en la compra o la venta de bienes inmobiliarios. En los últimos tiempos, el mensaje comercial de Sheets ha cambiado; ahora se centra en la manera de beneficiarse de las subastas hipotecarias.

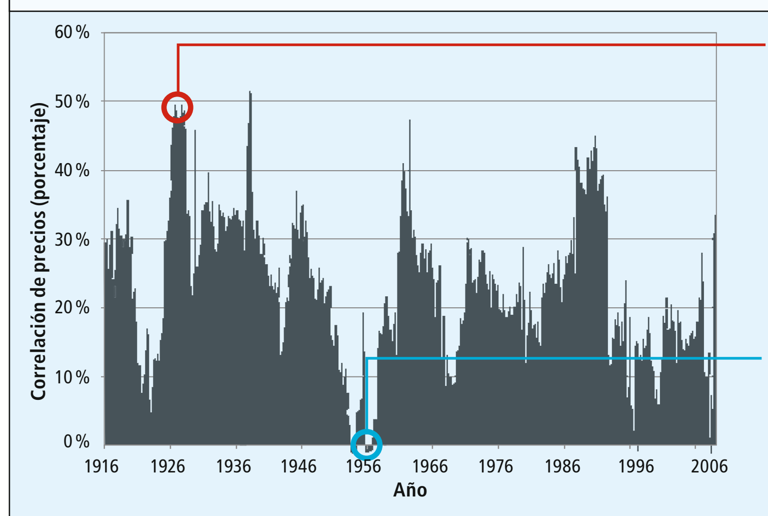
La economía conductual ha ido más allá, en busca de las razones por las que los inversores optan por semejante comportamiento. La disciplina ofrece un marco efectivo para la investigación y la formulación de políticas que ayuden a no caer en inversiones basadas en emociones o errores.

La llegada de la administración de Obama supone una aceptación creciente de la disciplina. Un grupo de destacados científicos conductuales proporcionó orientación sobre la manera de motivar a electores y donantes durante la campaña electoral. Cass Sunstein, especialista en derecho constitucional, autor de un libro titulado *Nudge* (Un pequeño empujón [para hacer algo]), que al parecer ha leído Obama, ha sido designado director de la Oficina de Información y Asuntos Normativos, que examina la regulación federal. Hay otros economistas conductuales, o al menos interesados en esta materia, que ocupan cargos en la Casa Blanca.

Sunstein y el coautor de *Nudge,* Richard Thaler, este último uno de los fundadores de la economía conductual, acuñaron la expresión "paternalismo libertario" para describir de qué manera las normas gubernamentales pueden apartar de una predisposición a adoptar decisiones erróneas. El paternalismo libertario se basa en un proceso heurístico de anclaje: una sugerencia de cómo se empieza

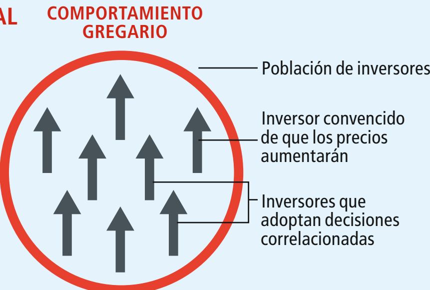
# UNA NUEVA MANERA DE PREDECIR BURBUJAS

Investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) han combinado diversas descripciones sobre la forma en que funcionan los mercados —inspirándose también en la teoría evolucionista— en un intento de realizar mejores predicciones que avancen en qué momento la actividad compradora y vendedora se volverá volátil y qué inversores sobrevivirán a las turbulencias del mercado. "Hipótesis del mercado adaptativo" es el nombre que recibe su propuesta.



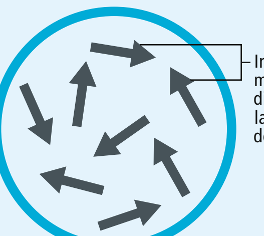

**LA CORRELACION: UN PRECIO CONDUCE A OTRO**
Un análisis informático basado en la hipótesis del mercado adaptativo investiga con qué intensidad los cambios de precio que ocurren en un día influyen en el grado de alteración de los precios al día siguiente. En resumen, el estudio se centra en el grado de correlación entre los cambios de precios.

**MERCADO IRRACIONAL**
Las subidas de precios con un elevado grado de correlación implican que los inversores entran en masa en los mercados y se puede estar formando una burbuja, tendencia que puede verse impulsada por una creencia irracional en que los precios subirán de forma indefinida.




**MERCADO RACIONAL**
Después del estallido de una burbuja y la desaparición del comportamiento gregario por parte de los inversores, el mercado vuelve a la situación de mayor "eficiencia" descrita por los economistas clásicos. En un mercado eficiente, los inversores tienen creencias independientes acerca de la evolución del mercado.



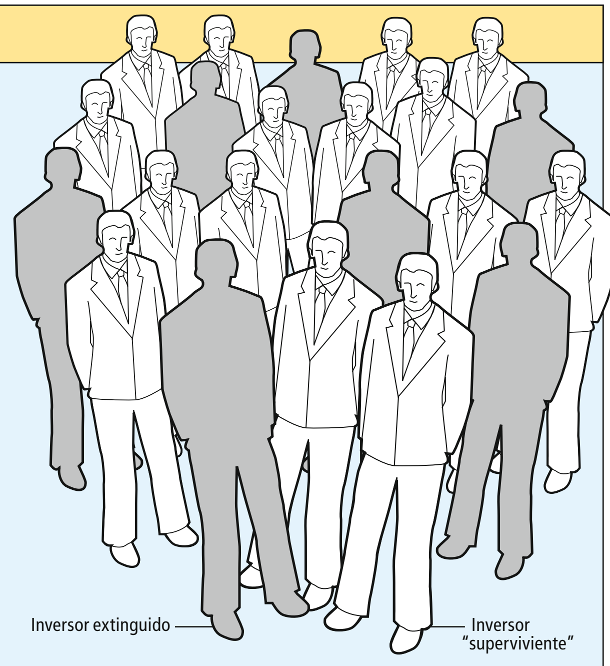

a pensar en algo con la esperanza de que el pensamiento se extienda a la conducta. Por ejemplo, se podría incentivar el ahorro para la jubilación en el caso de que las personas estuviesen suscritas de forma automática a un plan de jubilación desde un buen comienzo, en lugar de ofrecerles simplemente la opción de suscribirlo. "Los empleados tendrían el plan de jubilación si no hacen nada en sentido contrario, aunque tendrían la opción de abandonarlo", observa Thaler. "De esta forma se aseguraría que la imprevisión durante la vida laboral no genere pobreza cuando se llega a la vejez." Esta idea se refleja en los planes de la administración de Obama tendentes a que se incluya automáticamente a los empleados en un plan de jubilación en su puesto de trabajo.

La toma de decisiones puede ser más compleja que la simple reacción ante un suave empujón que guíe por un camino determinado. En esas circunstancias, se necesita una "estructura de opciones" para ayudar a una persona a decidir entre diversas alternativas. Pensemos en la adquisición de una casa; los compradores necesitan una información más clara acerca de la ilusión monetaria. "En el caso de que todas las hipotecas fuesen a 30 años y con un interés fijo, elegir la mejor sería sencillo: bastaría con escoger el tipo de interés más bajo", afirma Thaler. "En la actualidad, con tipos de interés variables, tipos iniciales por debajo del mercado, pago íntegro del principal al final de la hipoteca, penalizaciones por cancelación anticipada, etcétera, elegir las mejores hipotecas exige un doctorado en finanzas."

Una estructura de opciones exigiría a los prestamistas representar de forma clara las opciones para los prestatarios, reduciendo así un montón de papeles en el momento de la

**2. THORSTEIN VEBLEN sugirió a finales del siglo XIX que la economía debería considerarse una ciencia evolucionista; es una inspiración para quienes hoy siguen el espíritu de la idea de Veblen.**

MELISSA THOMAS (*arriba*); THE GRANGER COLLECTION (*Veblen*)




**LA SUPERVIVENCIA DE LOS FINANCIERAMENTE MAS FUERTES**
La hipótesis del mercado adaptativo combina la teoría evolucionista con información acerca de correlaciones y datos relativos a la salud financiera de inversores individuales e institucionales. Esta síntesis puede predecir quién tiene posibilidades de adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado y quién puede quedarse en el camino.

compra de una casa a sólo dos columnas: en una figurarían las diversas tarifas y en la otra los pagos de intereses. Y si esas dos columnas se guardasen en un formato digital, se podría consultarlas desde cualquier ordenador, lo que facilitaría la comparación con las ofertas de otras entidades crediticias.

En este mismo sentido, Robert J. Shiller, de la Universidad de Yale, describe una estrategia compleja diseñada para evitar los excesos de las economías de burbuja mediante una educación que prevenga de los errores en el "razonamiento económico". Shiller sugiere adoptar nuevas unidades de medida semejantes a la *Unidad de Fomento* (UF) creada por el gobierno chileno en 1967 y también adoptada por otros gobiernos iberoamericanos.

La UF, que constituye una protección contra la ilusión monetaria, permite a un comprador o vendedor saber si un precio ha aumentado en términos reales o simplemente lo ha hecho por efecto de la inflación. La UF representa el precio de una cesta de bienes y se usa de forma tan generalizada que los chilenos a menudo expresan los precios en estas unidades. "Chile ha sido el país del mundo que con mayor eficacia ha ajustado los precios a la inflación", afirma Shiller. "Los precios de las viviendas, las hipotecas, algunos alquileres, las pensiones alimentarias y las opciones de incentivo para directivos a menudo se expresan en estas unidades de medición de la inflación."

Shiller continúa siendo un defensor apasionado de nuevas técnicas financieras que podrían servir como armas para combatir las burbujas. Los reguladores están examinando los complejos instrumentos financieros que supuestamente protegían contra el impago de los valores respaldados por hipotecas que alimentaron el auge inmobiliario. No obstante, Shiller sostiene que los derivados (una clase de instrumentos financieros destinada a la protección contra los riesgos, aunque su uso inadecuado para la especulación contribuyó a la crisis financiera) pueden servir para garantizar que existan suficientes compradores y vendedores en los mercados inmobiliarios. Los derivados son contratos financieros que "derivan" de un activo subyacente; por ejemplo, una acción, un índice financiero o incluso una hipoteca.

Aunque puedan usarse incorrectamente tales instrumentos, Shiller considera que los derivados permiten una "cobertura" prudente para protegerse en coyunturas económicas muy negativas. En el mercado inmobiliario, los propietarios y las entidades crediticias podrían usar estos instrumentos financieros para protegerse de una caída de los precios, lo que generaría la liquidez suficiente para mantener el ritmo de las ventas.

## ¿Puede salvarnos la biología?

En última instancia, una solución a la crisis actual tendrá que ser configurada por nuevas formas de pensamiento sobre cómo actúan los inversores. Un enfoque creativo corregiría las deficiencias de la teoría económica existente mediante la fusión de lo viejo con lo nuevo. Andrew Lo, profesor de finanzas del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y uno de los responsables de un fondo de inversión libre, ha elaborado una teoría que, sin negar las aportaciones de las tesis racionalistas en lo que respecta al equilibrio de la economía y la hipótesis de la eficiencia del mercado, reconoce que la teoría clásica no refleja el funcionamiento de los mercados en todas las circunstancias.

La teoría del profesor Lo intenta lograr una gran síntesis que combine la teoría evolucionista con los postulados tanto de la teoría clásica como de la conductual. Dicho de otra forma, el planteamiento de Lo se basa en la idea de que la incorporación de la selección natural darwinista en las simulaciones del comportamiento económico puede ayudar a lograr una perspectiva útil sobre el funcionamiento de los mercados y facilitar predicciones más precisas sobre la manera en que se compor-

## BURBUJAS FAMOSAS DEL PASADO

**El fenómeno del aumento de los precios hasta niveles insostenibles para acabar desplomándose de forma repentina ha ocurrido reiteradamente durante siglos. A continuación se citan algunos ejemplos del pasado:**

**La "tulipomanía":** De 1634 a 1637, los holandeses sucumbieron a la compra frenética de bulbos de tulipán. Se llegaron a ofrecer tierras y joyas para satisfacer la pasión por estas flores.

**La burbuja de los mares del Sur:** Fue el equivalente del siglo XVIII al auge de las *punto com*. Los británicos invirtieron dinero en una compañía a la que se le había concedido el monopolio de todo el tráfico comercial con los mares del Sur. El éxito de la Compañía de los mares del Sur para captar inversiones generó una multitud de imitadores, incluida una empresa que deseaba extraer luz solar de los pepinos.

**El alza de la bolsa durante la presidencia de Hoover:** En Estados Unidos, miles de inversores ingenuos acudieron a la bolsa en 1928 y después de iniciarse la presidencia de Herbert Hoover, en marzo de 1929. El alza de los precios finalizó con el infausto desplome bursátil de octubre de 1929.

tarán los agentes financieros (individuos e instituciones).

Hay economistas que plantearon con anterioridad ideas similares. Ya en 1898, Thorstein Veblen propuso que la economía debía ser una ciencia evolucionista. Precediéndole, Thomas Robert Malthus ejerció una profunda influencia en el propio Darwin con su tesis de la "lucha por la existencia."

De la misma forma que la teoría de la selección natural sostiene que determinados organismos están mejor preparados para sobrevivir en un hábitat concreto, la hipótesis del mercado adaptativo considera a los distintos agentes del mercado, de los bancos a los fondos comunes de inversión, como "especies" que compiten por el éxito financiero. Asimismo, la hipótesis sostiene que estos agentes en ocasiones usan la heurística instintiva descrita por la economía conductual cuando invierten ("compiten") y algunas veces adoptan estrategias irracionales; por ejemplo, asumir riesgos mayores durante una racha de mala suerte.

"Los economistas sufren un desorden psicológico profundo que yo denomino 'envidia de la física'", afirma Andrew Lo. "Deseamos que el 99 % de la conducta económica se pudiese condensar en tres simples leyes de la naturaleza. En realidad, los economistas tenemos 99 leyes que abarcan el 3 % del comportamiento. La economía constituye una tarea humana singular; en cuanto tal, debe ser entendida en el contexto más amplio de la competencia, la mutación y la selección natural, es decir, la evolución."

Disponer de un modelo evolucionista para consultar puede permitir a los inversores adaptarse a medida que cambian los perfiles de riesgo de diferentes estrategias de inversión. Sin embargo, la principal ventaja de las simulaciones de Andrew Lo es probablemente la capacidad para detectar en qué momento la economía deja de estar en un equilibrio estable, con lo que se podría advertir a reguladores e inversores de que una burbuja se está formando o está a punto de explotar.

Un modelo de mercado adaptativo puede incorporar información del cambio de los precios en el mercado a la manera en que los individuos se adaptan a un hábitat determinado. El modelo puede, además, deducir si los precios de un día influyen en los del día siguiente, lo que indica que los inversores siguen un comportamiento gregario, tal como describen los economistas conductuales, una señal de que posiblemente la formación de la burbuja sea inminente.

Como resultado de ese tipo de configuración de modelos, las regulaciones podrían también "adaptarse" a los cambios en el mercado y, de esa forma, neutralizar los tipos de riesgos "sistémicos" ante los cuales los modelos de riesgo convencionales dejan a los mercados indefensos. Andrew Lo ha abogado por la creación de una junta de seguridad para los mercados de capitales, similar a la institución estadounidense que investiga los accidentes aéreos, para recopilar datos acerca de riesgos pasados y futuros que puedan amenazar el sistema financiero en toda su amplitud, y que podría servir como base para la creación de un modelo de mercado adaptativo.

A medida que el conocimiento del cerebro aclara las causas que subyacen a las conductas de los inversores, es posible que se encuentren nuevas pruebas que confirmen las deficiencias del concepto de *Homo economicus*. De acuerdo con la teoría clásica, a una inversor racional debería darle lo mismo si tiene 10 millones de dólares y pierde posteriormente 8 millones, o si empieza sin dinero y acaba con 2 millones de dólares. En ambos casos, el resultado final es el mismo.

No obstante, los experimentos de la economía conductual demuestran habitualmente que, a pesar de poder llegar a un resultado final similar, las personas (y otros primates) detestan más una pérdida de lo que desean una ganancia. Esta percepción de las ganancias y las pérdidas, que ha perdurado en la evolución de nuestra especie, es lo que anima a los seres vivos a guardar alimentos o a ponderar con cuidado una situación antes de arriesgar un enfrentamiento con depredadores.

Un grupo que no valora las pérdidas de forma diferente de su ponderación de las ganancias es el de los individuos con autismo, un desorden caracterizado por problemas en las relaciones con los demás. En pruebas realizadas, los autistas demuestran una lógica estricta cuando las ganancias se equilibran con las pérdidas, pero esta racionalidad aparente denota en sí un comportamiento anormal. "Cumplir con los principios lógicos de la elección económica racional puede ser anormal desde un punto de vista biológico", afirma Colin F. Camerer, profesor de economía conductual del Instituto de Tecnología de California.

La mejora de la comprensión de la psicología humana obtenida por los neurocientíficos ofrece esperanzas de cambiar para siempre nuestras presuposiciones fundamentales acerca de la forma en que funcionan las economías en su conjunto, y nuestra comprensión de las motivaciones de los participantes individuales, que compran casas o acciones y les cuesta juzgar si un euro vale tanto hoy como ayer.

## Bibliografía complementaria


YOUR MONEY AND YOUR BRAIN: HOW THE NEW SCIENCE OF NEUROECONOMICS CAN HELP MAKE YOU RICH. Jason Zweig. Simon & Schuster, 2007.

THE MIND OF THE MARKET. Michael Shermer. Times Books/Henry Holt, 2008.

EL ESTALLIDO DE LA BURBUJA: COMO SE LLEGO A LA CRISIS Y COMO SALIR DE ELLA. Robert J. Shiller. Ediciones Gestión 2000, 2009.

ANIMAL SPIRITS: HOW HUMAN PSYCHOLOGY DRIVES THE ECONOMY AND WHY IT MATTERS FOR GLOBAL CAPITALISM. George A. Akerlof y Robert J. Shiller. Princeton University Press, 2009.

UN PEQUEÑO EMPUJON (NUDGE): EL IMPULSO QUE NECESITAS PARA TOMAR LAS MEJORES DECISIONES EN SALUD, DINERO Y FELICIDAD. Richard H. Thaler y Cass R. Sunstein. Taurus, 2009.

# Sigue siendo necesario un plan sobre el clima

*Los mercados y las negociaciones no sustituyen a la planificación racional y las nuevas tecnologías*

Jeffrey D. Sachs

En EE.UU. existe el mito de que el mercado, y no la planificación, es la clave del éxito. El mercado supuestamente decidirá el futuro de nuestro clima por su cuenta en cuanto se instituyan la fijación de límites máximos a las emisiones y la compraventa de los derechos de emisión, que pondrá un precio de mercado a las emisiones de carbono. Tal creencia es una tontería: tanto el mercado como la planificación son esenciales para realizar con éxito cualquier tarea a gran escala, sea pública o privada. Necesitamos una hoja de ruta para actuar, detallada y adaptable, que trascienda los límites de emisiones y compraventa de derechos de emisión.

La administración de Obama ha declarado que las emisiones de gases de efecto invernadero de EE.UU. deberían ser de alrededor de un 15 por ciento más bajas en 2020 con respecto a la actualidad, y en 2050 alrededor de un 80 por ciento inferiores a las de 1990. Otras regiones, Europa en particular, demandan mayores recortes. Se trata, empero, de debates que no llevan a ninguna parte. Al no existir un plan claro para alcanzar objetivos concretos, no hay estimaciones fiables de los costes, de los instrumentos políticos ni de las decisiones que la sociedad tendrá que afrontar. Todo se deja en manos del mercado.

El negociador gubernamental sobre el clima ha llamado "pieza central" del programa nacional de Estados Unidos sobre el clima a la política de topes de emisiones y comercio de derechos. No es difícil advertir que anda errado. La limitación y comercio de emisiones influirá poco, por ejemplo, en si EE.UU. reactiva su industria de energía nuclear o no, tal como debería hacer para cumplir con los objetivos del clima. Un renacimiento nuclear dependerá de regulaciones, de la disposición pública, de leyes que fijen responsabilidades y del liderazgo de la administración y la educación pública, mucho más que de los topes y el comercio de emisiones, que desempeñaría, en el mejor de los casos, un papel secundario.

Las potencialmente cruciales técnicas de captación y almacenamiento de carbono en las centrales eléctricas de combustión de carbón dependerán de que se pruebe su seguridad, solidez y relación coste-eficacia. La prueba requerirá varios proyectos experimentales caros; todos necesitarán liderazgo político, normas claras, financiación pública y la participación activa de geofísicos que los supervisen. Los topes y compraventas de emisiones serán irrelevantes hasta que las nuevas técnicas se prueben en distintos escenarios. Los objetivos nacionales de reducción de emisiones podrían resultar fáciles o sumamente difíciles: dependerá del resultado de estos ensayos cruciales.




MATT COLLINS

Lo mismo ocurre con el futuro de los automóviles. Los topes y compraventas de emisiones o la subida de impuestos sobre la gasolina podrían ayudar a que los consumidores opten por los coches de consumo eficiente; pero el advenimiento de una flota nacional de coches híbridos, propulsados por pilas de combustible o completamente eléctricos dependerá mucho más de un esfuerzo de desarrollo publico-privado a gran escala que aúne investigación e inversión en una nueva red eléctrica y en otras infraestructuras fundamentales.

La administración estadounidense ha empezado las negociaciones internacionales sobre el clima con un talante de "escuchar y aprender", disposición sin duda positiva tras el acoso que ha sufrido la ciencia y la negligencia internacional de los años de Bush. También ha dejado que prepare el borrador legislativo al Congreso, cuyo resultado hasta ahora es un anteproyecto de ley de 648 páginas torpe y falto de estrategias, que contiene todo lo imaginable pero poca dirección estratégica, aparte de la referente a la limitación y comercio de emisiones. Las negociaciones mundiales y el tira y afloja legislativo pueden llegar a verse como una verdadera política del clima, pero nunca sustituirán a la planificación racional y la formulación de políticas.

Una cuestión crucial es si el gobierno de EE.UU. es capaz de crear un plan detallado y coherente. Durante decenios, el gobierno central ha destacado por una falta de coordinación entre los ministerios involucrados, una alergia a los planes detallados y la tendencia a que en el Congreso los intereses particulares frustren la lógica más básica de la previsión. Un hecho reseñable, sin embargo, es que muchos nombramientos de Obama relativos al cambio climático son autoridades de talla mundial en este campo. Esa erudición será necesaria; el cambio climático es el más complejo de los desafíos que enfrenta el mundo: toca el núcleo del sistema económico, plantea cuestiones tecnológicas fundamentales, tropieza con imponentes incertidumbres naturales y sociales, requiere una perspectiva de decenios e implica a todos los grupos de interés. Estas son las razones por las que se precisa más que nunca un plan adaptable y un marco racional, pero también hay razones que ayudan a explicar por qué —casi 20 años después de la Cumbre de Río de 1992 y el acuerdo sobre la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio climático— carecemos todavía de uno.

---

*Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.*

# Desnudos con los rayos T

*Opacos a luz ordinaria, numerosos materiales son transparentes a la radiación de terahertz: la visión a través de las ropas o de las paredes ya no es una utopía*

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

A los rayos X, tan caros a los radiólogos, les ha salido un serio competidor: las ondas de terahertz, también llamadas rayos T. Estas ondas electromagnéticas, entre las de radio y la luz visible, permiten ver a través de la materia. Conocidas hace más de un siglo, habían sido abandonadas a causa de unas dificultades técnicas que parecían insuperables. Sin embargo, avances recientes, especialmente vinculados a las técnicas de microfabricación, auguran para ellos un mejor porvenir.

¿Por qué son un reto la producción y la detección de ondas de terahertz? De entrada, estos rayos nada tienen de particular. Como los rayos X, la luz visible o las microondas, se trata de ondas electromagnéticas, compuestas de un campo eléctrico y de un campo magnético que oscilan de concierto e induciéndose mutuamente, mientras se propagan a la velocidad de la luz. Las ondas de terahertz se caracterizan por su gama de frecuencias, situada entre las de las ondas de radio y las de la luz infrarroja: entre 0,3 y 10 terahertz, siendo un terahertz igual a $10^{12}$ hertz (1000 gigahertz). Corresponde a longitudes de onda comprendidas entre 0,03 y 1 milímetro.

El método de detección de las ondas electromagnéticas depende mucho de su frecuencia. ¿Podrían detectarse las ondas de terahertz con una antena como las de radio? Para ser eficaz, una antena debe tener un tamaño equiparable a la longitud de onda de la radiación a detectar, algunos centímetros, por ejemplo, para los teléfonos celulares. Por añadidura, el circuito electrónico que trata la corriente eléctrica inducida en la antena debe funcionar a la frecuencia de la onda. En el caso de los rayos T, construir antenas de tamaño inferior al milímetro para conectarlas a un circuito electrónico que funcione a frecuencias superiores a 0,3 terahertz es algo que aún se halla en el ámbito de la ficción.

## Entre la radio y la radiación infrarroja

Las cámaras sensibles a la luz visible o a la infrarroja detectan la llegada de fotones, esas partículas que llevan energía luminosa. A su llegada al captador, cada fotón libera un electrón, que es recogido y participa en la formación de la imagen digitalizada. Ahora bien, la energía —inferior a un décimo de electronvolt— de los fotones de la luz de terahertz es insuficiente para provocar transiciones electrónicas en la materia: como mucho, esos fotones pueden hacer vibrar o rotar ciertas moléculas. Por consiguiente, al no poder ser detectada ni como una radioonda ni como una partícula de luz, la radiación de terahertz ha permanecido inservible hasta muy recientemente.

Pero tales ondas encierran mucho interés. Tal como acabamos de recordar, los fotones de terahertz poseen muy poca energía: interactúan poco con la materia y, por ello, ésta no los absorbe apenas. Pueden atravesarla, como lo hacen las radio-ondas. Así, materiales tan disímiles como los tejidos orgánicos, los plás-



**1. Sólo el agua y los metales bloquean las ondas de terahertz. Los tejidos biológicos, que contienen agua, son relativamente opacos a esa radiación. Una cámara sensible a las ondas de terahertz podría formar la imagen de un animal —de una especie protegida, por ejemplo— encerrado en un paquete.**

BRUNO VACCARO

**2. La radiación terahertz ambiente, sin "iluminación" artificial por un aparato emisor de rayos T, basta para obtener imágenes útiles. Las aplicaciones policiales son evidentes, tal como demuestran los dos fotografías integradas en el dibujo, la de la izquierda tomada con luz normal, la de la derecha, correspondiente a una imagen de terahertz.**

ticos, las cerámicas y el ladrillo son transparentes a los rayos T. De hecho, sólo el agua y los metales los bloquean. Y aun así, esa radiación atraviesa la niebla y se adentra algunos milímetros en los tejidos biológicos.

Por otra parte, a diferencia de las ondas de radio, los rayos T se difractan poco a nuestra escala. Las ondas no divergen cuando pasan por una obertura muy grande respecto a la longitud de onda. Siendo ésta inferior a un milímetro, los objetos de medidas comunes perturban poco las ondas de terahertz. O sea, los rayos T se propagan en línea recta, como la luz. Pueden enfocarse con lentes y así formar imágenes.

## Penetrantes pero inofensivos

Pese a todas sus ventajas, el despegue de las técnicas de terahertz es reciente; ha hecho falta reducir unos costes desorbitados y resolver más de un problema técnico. Como son medio radio, medio luz, las cámaras de rayos T que se han construido combinan las técnicas de esos dos campos.




Al llegar al objetivo de la cámara, la "luz" de terahertz encuentra una lente, de material polimérico, que forma una imagen en un plano situado detrás de ella. En ese lugar, los rayos T son capturados por unas guías de ondas —especie de microcavidades— que los encaminan hacia una red de antenas de algunas decenas de micras de largo, grabadas en una película de oro. La película se halla depositada sobre un material sensible al calor, por ejemplo el bismuto. Las antenas, que captan con gran eficacia la radiación de terahertz, no están conectadas a ningún circuito electrónico. La corriente eléctrica inducida por la onda calienta la antena y su soporte por efecto Joule, como en una resistencia. La elevación de temperatura es detectada y transformada en imagen del mismo modo que en una cámara de infrarrojos.

Esa cámara es lo bastante sensible para funcionar de modo pasivo, es decir, sin necesidad de iluminar la escena con una fuente de ondas de terahertz. Los materiales transparentes a las ondas de terahertz, como los tejidos orgánicos secos, son invisibles en las imágenes obtenidas. En cambio, los materiales opacos a esos rayos reflejan la radiación terahertz y la reemiten: por tanto, son detectados por la cámara. En otras palabras, la cámara terahertz ve el cuerpo a través del vestido.

Paralelamente al desarrollo de los detectores, se han producido fuentes de radiación terahertz intensa, bien mediante aceleradores de partículas, bien mediante nanotransistores. Esas fuentes abren la puerta a interesantes aplicaciones en radiología. En efecto, como los fotones de terahertz son mucho menos energéticos que los fotones X, los rayos T no son ionizantes y no encierran los peligros de los rayos X. Esas nuevas fuentes pueden emplearse para iluminar objetos y observarlos en transparencia: se obtienen entonces unas imágenes, similares a radiografías, cuyos materiales se muestran tanto más oscuros cuanto más opacos son a los rayos T. Ello posibilita contar el número de cerillas en una caja sin abrirla, visualizar el contenido de un sobre sospechoso u obtener una vista tridimensional de una muela cariada.

# Tres problemas sobre uso y mención

*'forma un subtítulo cuando se agrega a su propio nombre' forma un subtítulo cuando se agrega a su propio nombre*

Gabriel Uzquiano

¿Cuál es el problema con el siguiente argumento? Como 6 es el denominador de 2/6 y 3 es el denominador de 1/3, del hecho de que 1/3 = 2/6, se sigue que 3 es el denominador de 2/6. ¿Cómo puede una misma fracción tener dos denominadores diferentes? El problema se debe a una confusión entre uso y mención. Aunque existe un único número racional al que nos referimos por medio de dos fracciones diferentes, cada una de ellas es una expresión que consta de un numerador y un denominador, ambos numerales.

¿Cuál es el resultado de agregar 11 a 111? ¿122 o 11111? Hemos de distinguir la pregunta de cuál es el resultado de sumar los números 11 y 111 de la pregunta de cuál es el resultado de concatenar el numeral que denota 111 con el numeral que denota 11. La respuesta a la primera pregunta es el número 122 mientras que la respuesta a la segunda pregunta es una expresión que consta de cinco caracteres idénticos. ¿Cómo se eliminan tales ambigüedades? El remedio convencional es el entrecomillado.

Pensemos en una expresión como en una secuencia de caracteres. El resultado de ponerla entre comillas es una nueva expresión —cuyo primer y último carácter es una comilla— que funciona sintácticamente como un nombre cuya denotación es precisamente la expresión que aparece entre comillas. Mediante el entrecomillado podemos eliminar la ambigüedad de la pregunta anterior como sigue:

(i) ¿Qué ocurre cuando agregamos 11 a 111? Obtenemos el número 122.

(ii) ¿Qué ocurre cuando agregamos '11' a '111'? Obtenemos una expresión de cinco caracteres idénticos: '11111'.

Cuando una expresión aparece sin comillas en una oración, la expresión es *usada*. Si la expresión aparece entre comillas, entonces aparece *mencionada*.

Uno de mis antiguos profesores en MIT, Richard Cartwright, solía asignar problemas sutiles sobre uso y mención. Empecemos con dos problemas de los que solía utilizar.

## Problema A

Añadir comillas a las expresiones siguientes para convertirlas en oraciones verdaderas o falsas. Siempre que exista, es preferible una solución bajo la cual la oración es verdadera. También es preferible minimizar el número de comillas añadidas; por tanto, siempre que exista, la mejor solución es el resultado de añadir el menor número de comillas para obtener una oración verdadera.

#1. Barcelona se encuentra al norte de Tarragona, pero Tarragona no se encuentra al sur de Barcelona.
#2. La última palabra de la mejor solución para #1 es Barcelona.
#3. Un nombre para la última palabra de la mejor solución para #2 es Barcelona.
#4. La última palabra de Tarragona es polisilábica es polisilábica.
#5. La última palabra de #5 es obscena.
#6. La última palabra de #5 es obscena.

## Problema B

Digamos que una expresión es *incorregible* si —y sólo si— no hay manera de añadir comillas para evitar que la expresión resultante sea o bien falsa o carente de sentido. A primera vista parecería que:

(1) #5 es incorregible
(2) #6 no es incorregible
Y sin embargo:
(3) #5 es la misma expresión que #6

Pero uno de los enunciados anteriores debe ser falso. Si $x$ e $y$ son una y la misma secuencia de caracteres, entonces todo lo que sea cierto de $x$ debe ser cierto de $y$, y viceversa. ¿Cuál de los enunciados anteriores es falso? ¿Y por qué?

A continuación sigue un problema que ilustra una seria dificultad con el entrecomillado como mecanismo de resolución de la ambigüedad.

## Problema C

Determinar para cada una de las siguientes oraciones si es verdadera o falsa:

#1. '1' concatenado consigo mismo es 11.
#2. '1' concatenado consigo mismo es '11'.
#3. '1' concatenado con '1' es '11'.
#4. 'forma una oración cuando se agrega a su propio nombre' forma una oración cuando se agrega a su propio nombre.
#5. 'forma una oración falsa cuando se agrega a su propio nombre' forma una oración falsa cuando se agrega a su propio nombre.

## Solución de A

#1. Barcelona se encuentra al norte de Tarragona, pero 'Tarragona' no se encuentra al sur de Barcelona.
Verdadero. La expresión 'Tarragona' no se encuentra al sur de la ciudad de Barcelona.

#2. La última palabra de la mejor solución para #1 es Barcelona.
Falso. Barcelona no es una palabra. No ayudaría poner la última palabra entre comillas ya que nuestra solución anterior a #1 no es la única solución óptima. Otra solución óptima hubiera entrecomillado únicamente la segunda ocurrencia de 'Barcelona', ya que la ciudad de Tarragona no se encuentra al norte de la expresión 'Barcelona'.

#3. Un nombre para la última palabra de la mejor solución para #2 es "Barcelona".
Verdadero. La mejor solución para #2 consiste en dejarla como está. Como la última palabra es 'Barcelona', "Barcelona" es un nombre para esa palabra.

#4. La última palabra de 'Tarragona es polisilábica' es polisilábica.
Verdadero. 'Polisilábica' es polisilábica. El resultado de poner la última palabra

### ¿Quiere saber más?

Richard Cartwright publicó algunos de sus problemas en un apéndice a *Philosophical Essays*. MIT Press, 1987.

George Boolos discute la paradoja de Ernst en "Quotational Ambiguity" en *Logic, Logic and Logic*. Harvard University Press, 1998.

entre comillas también sería verdadero aunque la solución no sería óptima.

#5. La última palabra de #5 es obscena.
Falso. La última palabra de #5 es 'obscena' pero la palabra 'obscena' no es particularmente obscena. Tampoco sería obsceno el resultado de entrecomillar 'obscena' u "obscena" u "'obscena'".

#6. La última palabra de #5 es 'obscena'.
Verdadero. Como decidimos no entrecomillar ninguna expresión en #5, se sigue que la última palabra es 'obscena'.

## Solución de B

Empecemos con una distinción. ¿Cuántas letras hay en la palabra 'seis'? ¿Tres o cuatro? Aunque hay tres letras-tipo, dos vocales y una consonante, hay cuatro letras-ejemplar, ya que esta última consonante ocurre dos veces, una al principio de la palabra y otra al final. Una distinción similar se aplica a oraciones: #5 y #6 son dos ejemplares de la misma oración-tipo. Como son dos ejemplares de la misma oración-tipo, ambas son cualitativamente idénticas, ya que han sido construidas del mismo modo a partir de los mismos caracteres. Sin embargo, no es cierto que #5 y #6 sean numéricamente idénticas o, dicho de otro modo, que sean uno y el mismo ejemplar. Uno de ellos sucede a #4 y precede a #6 en la lista mientras que la otra sucede a #5 y no precede a nadie en la lista. Pero lo que es más importante, #5 es el nombre de la primera oración-ejemplar pero no de la segunda y, de la misma manera, #6 es el nombre de la segunda oración-ejemplar pero no de la primera. Por tanto, no hay razón para esperar que todo lo que sea cierto de una sea cierto de la otra. (1) y (2) pueden ambos ser verdaderos.

## Solución de C

#1. '1' concatenado consigo mismo es 11.
Falso. El resultado de concatenar '1' con '1' es el numeral '11' y no el número 11.

#2. '1' concatenado consigo mismo es '11'.
Verdadero. La única manera de leer #2 como una oración —en vez de como el nombre de una expresión— es aquella bajo la cual dice que el resultado de concatenar la expresión '1' con la expresión '1' es el numeral '11'. Nótese, sin embargo, que alguien podría tomar la expresión #2 como el nombre de la expresión

1' concatenado consigo mismo es '11

George Boolos atribuye la observación a uno de sus estudiantes en el MIT, Michael Ernst.




#3. '1' concatenado con '1' es '11'.
#3 no es sólo ambiguo; es verdadero bajo una resolución de la ambigüedad y falso bajo otra. Peor todavía, #3 admite como mínimo tres interpretaciones (ejercicio para el lector: ¿cuántas más?):

#3a. El resultado de concatenar la expresión '1' con la expresión '1' es la expresión '11'. Verdadero.

#3b. La expresión

1' concatenado con '1

es la expresión '11'. Falso.

#3c. #3 no es siquiera una oración, sino más bien el nombre de la expresión

1' concatenado con '1' es '11

#4. 'forma una oración cuando se agrega a su propio nombre' forma una oración cuando se agrega a su propio nombre.
Verdadero. #4 es el resultado de agregar la expresión 'forma una oración cuando se agrega a su propio nombre' a su propio nombre y #4 es una oración.

#5. 'forma una oración falsa cuando se agrega a su propio nombre' forma una oración falsa cuando se agrega a su propio nombre.
Aquí nos enfrentamos a un grave problema, ya que #5 es el resultado de agregar 'forma una oración falsa cuando se agrega a su propio nombre' a su propio nombre. Pero, según #5, esa oración es falsa. Se sigue que lo que dice #5 ocurre si y sólo si #5 es falso. Por tanto, #5 es verdadero si y sólo si #5 es falso. Parece pues que #5 no puede ser verdadero ni falso. Este ejemplo se debe a W. V. Quine, quien quería ilustrar la posibilidad de obtener oraciones paradójicas aun contando con escasos recursos expresivos.

Resta la cuestión de cómo refinar la práctica del entrecomillado para evitar el riesgo de ambigüedad. Muy brevemente, la primera parte de una solución propuesta por George Boolos consiste en introducir un número infinito de "comillas" a partir de dos símbolos: º, 'º, "º, "'º, ""º, etc.

El nombre de una expresión α es el resultado de ponerla entre "comillas" del mismo tipo. Por ejemplo: 'º 1º concatenado con º1'º es el nombre de la expresión:

1º concatenado con º1

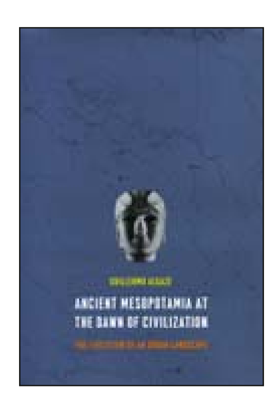
mientras que º11º es el nombre del numeral. Así por ejemplo, dos de las lecturas de #3 en el problema C se formularían:

#3a. º1º concatenado con º1º es º11º.

#3b. 'º1º concatenado con º1'º es º11º.

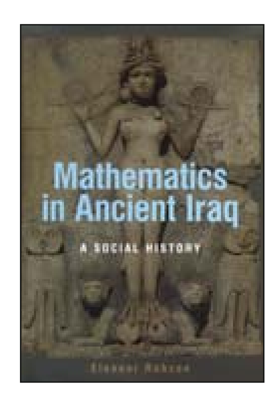
---

*Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.*




ANCIENT MESOPOTAMIA AT THE DAWN OF CIVILIZATION. THE EVOLUTION OF AN URBAN LANDSCAPE,

por Guillermo Algaze. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.




MATHEMATICS IN ANCIENT IRAQ. A SOCIAL HISTORY,

por Eleanor Robson. Princeton University Press; Princeton, 2008.

# Sumer

*Cuna de la matemática*

Los neandertales ocuparon las cuevas de los montes Zagros, al norte de Iraq. Los hombres anatómicamente modernos han habitado esa región a lo largo de decenas de miles de años. Entre 15.000 y 10.000 antes de Cristo, comenzó un lento proceso de asentamiento sedentario. Las comunidades construyeron viviendas, santuarios, almacenes y cementerios. A lo largo de los milenios siguientes, la caza y la ganadería fueron abriendo el camino hacia la agricultura y la cría de animales domésticos. Hacia el 7000 antes de Cristo, se cultivaban cebada y el trigo candeal. Los perros de caza fueron domesticados antes incluso de la existencia de la agricultura. Ovejas, cabras y cerdos, ninguno de los cuales constituían competidores directos de la dieta de los humanos, fueron explotados por su carne y productos derivados. Hasta después del 6500 a.C., no apareció el ganado vacuno en Oriente Medio. Desde el 6000 a.C., mucho antes que la escritura, el hombre del Neolítico empleó calculadores geométricos en arcilla y piedras para registrar las transacciones y los trueques.

Durante la segunda mitad del quinto milenio, los asentamientos eran característicos de la época calcolítica. Se asocia la llanura aluvial del Tigris y el Eufrates con la cuna de la civilización. En la Mesopotamia meridional se dieron, en las postrimerías del quinto milenio y a lo largo del cuarto milenio antes de la era cristiana, los primeros pasos firmes hacia la urbanización (*Ancient Mesopotamia at the Dawn of Civilization. The Evolution of an Urban Landscape*). Lo avalan, entre otras, las pruebas analíticas de radiocarbono. Las excepcionales condiciones naturales que convergieron en la cuenca fluvial permitieron el despegue de su economía, basada en la agricultura, la técnica y el empuje empresarial de sus élites dedicadas al comercio de los excedentes, primero zonal y luego exterior, a través de un sistema de transporte que combinaba la red fluvial con las recuas de caravanas. En Sumer se satisficieron, por vez primera, las dos exigencias del asentamiento de una civilización urbana, a saber, un feraz entorno natural, con excedentes de las cosechas para el comercio, y el poder político.

Durante el predominio de Uruk (3900/3800 a.C.–3200/3100 a.C.), en el sur de Iraq, proliferó una policromía de ciudades estado unidas bajo una misma cultura, que no tuvo par en Asia sudoccidental. La cristalización de la temprana civilización de Sumer se produjo tras siglos, si no milenios, en que apenas si divergían los emplazamientos del sur del resto de las sociedades de Oriente Próximo. Mas ya hacia la segunda mitad del cuarto milenio, la Mesopotamia superior y la inferior dejaron de desarrollarse en tándem. Las tierras bajas del delta del Tigris y el Eufrates habían superado a sus vecinos inmediatos y competidores potenciales en términos de escala y grado de diferenciación. Por el tercer cuarto del cuarto milenio, antes quizá, la Mesopotamia meridional se convirtió en un poderoso centro de interacción donde se forjaron microestados pujantes. La temprana civilización sumeria representa un punto de inflexión, que alcanzó su máximo relieve durante los períodos Uruk medio y tardío (c. 3600–3200/3100). Durante el período que les precedió, el Uruk temprano (c. 3900–3600), se inició la actividad comercial. Lo ratifican las tablillas protocuneiformes, que nos ayudan a identificar diversas categorías de individuos y bienes. El propio arte de Uruk impuso sus convenciones artísticas en Mesopotamia hasta la desaparición de los imperios neoasirios y neobabilónico en el milenio primero antes de Cristo.

Resulta fácil visualizar el papel del comercio exterior e interior, documentado por pruebas arqueológicas. Sea por caso, el sílex. La zona aluvial de Mesopotamia se halla enteramente desprovista de recursos de sílex. Las herramientas de corte y los materiales para la manufactura de tales útiles constituyen uno de los productos de transacción. Otro tanto ocurre con el transporte de metales, atestiguado desde finales del período Ubaida (milenio quinto). Inicialmente los objetos de metal llegan al sur perfectamente acabados, procedentes de Irán y Anatolia, con una avanzada metalurgia. Una técnica que veremos pujante en el sur mesopotámico durante el período Uruk medio. Muy precoz es, en cambio, el arte textil en Uruk, aprovechando la lana de sus rebaños de ovejas. Merece subrayarse la importancia adquirida por los tintes. Eran de origen vegetal en un comienzo, extraídos de *Chrozophora tinctoria, Arnebia tinctoria, Papaver*, sp., *Salicornia* sp./*Cornulaca* sp. y *Punica granatum*, que abundaban en los altiplanos siro-mesopotámicos. Más tarde llegaron los tintes de origen animal (gasterópodos).

La escritura cuneiforme se extiende a lo largo de tres mil años, desde la emergencia de las protociudades con su burocracia asociada, en las postrimerías del cuarto milenio antes de Cristo, hasta el declive gradual de las formas indígenas de pensamiento bajo los emperadores persas,

seleúcidas y partos, en torno al comienzo de la era cristiana. En la segunda mitad del siglo XIX se descifraron las dos lenguas principales del Iraq de la antigüedad: el acádico, precursor semítico del hebreo y del árabe, y el sumerio, que no parece guardar parentesco con ningún idioma actual. (El centro del mundo cuneiforme se hallaba en la llanura aluvial entre Bagdad y la costa del Golfo, planicie por donde discurrían el Tigris y el Eufrates. Recibió distintos nombres en la antigüedad: Sumer, Akkad, Babilonia, Kardunias, o simplemente, la Tierra. El centro del poder se desplazó hacia el norte, hacia Siria e Iraq septentrional, al este del Eufrates, en una región denominada en la antigüedad Asiria, Subartu, Mitanni o el país de Asur.)

La primerísima escritura era un sistema muy limitado en su finalidad y función. Hacia la primera mitad del tercer milenio a.C. fue ya ganando poder y flexibilidad a través del uso de los mismos signos para representar no sólo una idea o un objeto, sino también el sonido de la palabra en cuestión, en lenguaje sumerio primero y luego en acádico. A medida, pues, que la escritura fue adquiriendo, en cuanto lenguaje específico, capacidad de registrar sílabas, fue haciéndose cada vez más importante ordenar los signos en líneas sobre la superficie de la tabilla, siguiendo el orden del lenguaje hablando. Al propio tiempo, los signos perdieron sus cualidades visuales curviformes y pictográficas, convirtiéndose cada vez más en cuneiformes. No obstante, los signos retuvieron su significación ideográfica incluso a medida que fueron adquiriendo sus nuevos significados silábicos. En una palabra, se hicieron multivalentes: un mismo signo cuneiforme podía encerrar hasta 20 significados diferentes a tenor del contexto en que se encontrase.

El sumerio, probablemente el primer lenguaje escrito del mundo, murió como lengua materna durante las postrimerías del tercer milenio y comienzos del segundo milenio antes de Cristo, pero continuó usándose como lengua culta y académica hasta el inicio de la era cristiana. El rasgo principal del sistema sumerio es la ergatividad: distinción gramatical entre los sujetos de los verbos transitivos e intransitivos.

La historia de la matemática en escritura cuneiforme abarca ese mismo intervalo. Hacia finales del cuarto milenio, la gestión institucional necesitaba un mayor refinamiento numérico y la invención de signos escritos para los productos y bienes. A medida que las técnicas de ganadería se hicieron más eficientes y las cosechas más cuantiosas, la protección y distribución equitativa de los bienes se tornó apremiante. En ese marco se introdujo el número, en forma de piezas de arcilla o guijarros. Esas piezas "de cálculo" se encuentran por villas y emplazamientos de todo Oriente Medio, desde Siria occidental hasta Irán central. Asoma entonces el cultivo de la matemática, cuyo desenvolvimiento Eleanor Robson reconstruye en *Mathematics in Ancient Iraq. A Social History* en su contexto social, religioso, económico y político.

La matemática no era una disciplina abstracta, elitista, sino un componente clave en la ordenación de la sociedad y comprensión del mundo. Aparece escrita sobre tablillas de arcilla, recuperadas por los arqueólogos a cientos de miles. Descifradas y traducidas, las tablitas nos muestran que la matemática mesopotámica no se limitó a ser precursora de la griega, sino que ocupa un lugar de privilegio por sí misma. Fue la primera matemática "pura" del mundo. Este estatuto especial reposa sobre la abstracción y refinamiento del sistema sexagesimal, un enfoque bastante adecuado para la raíz cuadrada de 2 y las complejidades aparentemente pitagóricas de la famosa tablilla cuneiforme Plimpton 322, cuya función abarca desde la teoría de números hasta la astronomía pasando por la trigonometría. Ese primer sistema posicional se introdujo a comienzos del segundo milenio antes de Cristo.

La matemática se transmitió en sumerio y acádico. (Iraq, Sumer, Babilonia, Mesopotamia: bajo cualquiera de esos nombres suelen aparecer en los libros de historia de la matemática cuando se asigna el origen de la matemática "pura" a un pasado remoto de la región situada entre las orillas del Tigris y el Eufrates.) Abundan en las tablillas ejercicios planteados y resueltos, así como tablas metrológicas. Los primeros registros escritos conocidos, los documentos de cuentas del templo, procedentes del cuarto milenio de Uruk, utilizaban una docena de sistemas de numeración, que no sólo eran de valor absoluto, sino que también estaban determinados por el bien a contabilizar o medir. En el transcurso del tercer milenio, esta notable variedad de metrologías se fue gradualmente racionalizando en torno a la longitud, área, volumen, peso y número (cardinales de cómputo). Aunque el número sesenta se convirtió en prominente, todos los sistemas, salvo el peso, retenían bases equiparables a los más recientes sistemas imperiales predecimales y todos los signos usados para unidades metrológicas y diferentes notaciones según los lugares.

En las tablillas el texto no se escribe sobre una superficie lisa, como sobre el papel o sobre el papiro, sino sobre una extensión acolchada, de arcilla levigada (es decir, arcilla limpia de partículas extrañas para conseguir pureza y suavidad). Miden, en promedio, unos 7,5 cm cuadrados por 2,5 cm, pues van desde las proporciones de un sello de correos hasta las de una pantalla de ordenador. Varían de tamaño y forma de acuerdo con el lugar y el tiempo de manufactura, así como del contenido escrito. La parte frontal, u *obversa*, de la tabilla era más lisa que la dorsal, o *reversa*. Las tablillas solían ser rectangulares, con la escritura, paralela a la parte más corta, que cubría la superficie entera. Cuando el escriba llegaba a la parte inferior de lo obverso, en vez de girar la tablilla por su eje vertical (a la manera de páginas de un libro), se doblaba horizontalmente, de suerte que el texto continuase ininterrumpido por la arista inferior y seguía en el reverso.

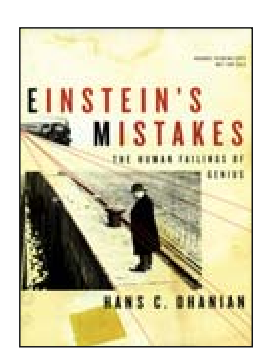
Ya hacia finales del cuarto milenio, los contables de Uruk se basaban en cantidades estandarizadas y en relaciones numéricas fijas. A lo largo del tercer milenio las abstracciones, las aproximaciones y las estandarizaciones se aplicaban a un dominio cada vez más amplio de recursos y conceptos, incluido el del tiempo invertido en la producción. La conversión del trabajo en bien mercantil se empleó como herramienta de gestión y como medio de control social. Los primeros cómputos escritos —de Uruk, del cuarto milenio— empleaban metrologías específicas de cada bien con diversidad de relaciones numéricas diferentes entre las unidades. Esas metrologías originales continuaron empleándose a lo largo del tercer milenio, e incluso más allá, ya fuera esencialmente inmutadas (áreas, por ejemplo) o acometiendo reformas periódicas (en los volúmenes). Mientras que el período Ur III se ha presentado recientemente como un período de estancamiento matemático y represión, las pruebas aquí acumuladas nos revelan, por el contrario, que constituyó un pe-

ríodo de innovación cognitiva, igualado sólo por el primer compromiso con los números en la escritura, a finales del cuarto milenio. El sistema sexagesimal se impuso en la burocracia y los escribas operaban con él. La cultura numérica de Ur III combinaba los estándares de precisión con las ideas sargónicas de aproximación, estandarización y predicción. La sexagesimalización no fue de suyo algo completamente inédito, pero sí adquirió una fuerza dominante en diversas reformas centralmente impuestas de pesos y medidas a lo largo del milenio tercero.

Cuando el rey Sargón llegó al poder en Babilonia septentrional en torno a 2340 a.C. no había nada que sugiriese que su reinado iba a suponer un punto de incidencia en la historia del Iraq de la antigüedad clásica. Su fama pervivió en escritura cuneiforme a lo largo de dos milenios. Mientras que los dibujos abstractos y las representaciones de objetos individuales y figuras son comunes en el arte de un período mesopotámico auroral, las representaciones visuales del entorno natural y construido aparece sólo en el período sargónico. Asiria no había entrado en la historia de la matemática hasta fecha reciente. Es cierto que hay muchas menos pruebas de actividad matemática en Asiria que en Babilonia en general y en el período Babilónico Inicial en particular. Pero la abundancia de tablillas recuperadas en los últimos años y el descubrimiento de escuelas de escribas en asentamientos urbanos dan prueba del desarrollo de la matemática allí. La matemática de Asiria se desarrolla en tres fases. En el Período Asirio Inicial (c. 1940-1760 a.C.) se utilizaba matemática predominantemente decimal por familias comerciantes de la ciudad de Assur y por funcionarios del palacio de Mari en el Eufrates medio. El Período Asirio Medio, c. 1350-1050 a.C. y durante el Período Asirio Reciente c. 750-610 a.C., las cuantificaciones eran un recurso retórico importante en las inscripciones reales.

El colapso del reino Babilónico Inicial hacia el 1600 a.C. precipitó la desaparición de la escuela de matemáticos del registro arqueológico.

**Luis Alonso**




EINSTEIN'S MISTAKES. THE HUMAN FAILINGS OF GENIUS,
por Hans C. Ohanian. W. W. Norton & Company, Inc., 2008.

# Einstein

## *Errores sobre errores*

No es la primera vez que se denuncian errores en la física de Einstein. Por ejemplo, lo hizo en 2005 Steven Weinberg en su artículo "Einstein's mistakes" (Los errores de Einstein), que, por cierto, Ohanian no cita en su bibliografía. Pero en el libro de éste el número de errores que se comentan es muy superior: veintitrés. Aparecen contextualizados dentro de una semblanza biográfica *sui generis*, que conduce a cierta desmitificación del personaje, a la vez que muestra el carácter humano del conocimiento científico.

Es obligado extremar las precauciones para no introducir pifias en un libro dedicado a poner de manifiesto errores de otros. Unos ejemplos, citados por orden de aparición, muestran que Ohanian no ha cuidado este aspecto. Newton no sustituyó a Hooke como presidente de la Royal Society (p. 65) porque éste nunca lo fue. Boltzmann no vivió en la década de 1960 (p. 110), sino cien años antes. El premio Nobel de física no se le concedió a Einstein en 1919 (p. 141), sino en 1922, como Ohanian escribe en otras ocasiones. Y no le fue concedido por sus ideas sobre los cuantos de luz —que nunca fueron aceptadas, por considerarse entonces incompatibles con el electromagnetismo de Maxwell—, sino "por sus servicios a la física teórica y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico", sin que en la mención se haga referencia alguna a sus ideas cuánticas.

Es cierto que la primera deducción que hizo, en 1905, de la relación $E = mc^2$ es de validez limitada: representa la energía cinética de un electrón con aceleración lo suficientemente pequeña para poder prescindir de las pérdidas de energía por emisión de radiación. Hoy sabemos que la igualdad es más general y, sobre todo, que expresa la equivalencia entre masa y energía. Pero este primer paso de Einstein, ¿puede ser calificado como un error? No en mi opinión: es sólo consecuencia de contemplar con ojos de hoy la creación científica del pasado.

En el capítulo 6, dedicado a los cuantos de luz, se afirma (p. 135) que, en 1905, Einstein concluyó que "la radiación se comporta como si estuviera constituida por partículas puntuales... llamó a estas partículas cuantos de luz, o '*Lichtquanten*'. Hoy llamamos fotones a estas partículas..." Ohanian no tiene razón aquí y su forma de expresarse implica un notable error conceptual. En el texto original no aparecen las partículas (*Teilchen*) ni los *Lichtquanten*, sino los cuantos de energía (*Energiequanta*), que es a los que se refiere la conclusión de Einstein. El que éste empleara alguna vez el término *Lichtquanta* como sinónimo de *Energiequanta* sí puede considerarse un lapsus de Einstein —no un error—, pues si verdaderamente hubiese creído, en 1905, que la luz estaba constituida por partículas, además de haber estudiado el choque inelástico entre éstas y los electrones (efecto fotoeléctrico), habría también considerado el choque elástico entre ambos, anticipando en casi veinte años el análisis del "efecto Compton".

A pesar de todo, el libro es muy recomendable. Los no especialistas encontrarán en el texto episodios que obligan a cuestionar ciertos aspectos del llamado *método científico* y, tal vez, a contemplar desde una perspectiva más adecuada "el mito Einstein". Pero aquellos con más formación específica deben tener en cuenta que la exposición de Ohanian frecuentemente representa una interpretación personal —no plenamente compartida por otros estudiosos— de lo que él califica como "errores de Einstein". En este sentido, es muy recomendable contrastar estas opiniones con la de físicos, filósofos e historiadores especializados en los temas tratados.

**Luis Navarro Veguillas**

# EN EL PROXIMO NUMERO DE OCTUBRE 2009



## Neandertales,

*por Kate Wong*

El hombre moderno y el neandertal coexistieron en Europa durante miles de años. ¿Por qué desaparecieron unos homínidos tan parecidos a nosotros? Parece que intervinieron diversos factores sutiles.

## Los límites del crecimiento cuando decline la producción de petróleo,

*por Charles A. S. Hall y John W. Day, Jr.*

Se hablaba mucho en los años setenta de que los recursos naturales disponibles para una población mundial creciente eran limitados. Es hora de retomar el problema.





## Aspectos sorprendentes de la enfermedad celiaca,

*por Alessio Fasano*

Gracias al estudio de esta patología provocada por alimentos se ha descubierto un proceso que quizás actúe en numerosas enfermedades autoinmunitarias.

## Residuos nucleares: ¿nuevas soluciones?,

*por Matthew L. Wald*

El monte Yucca era la solución propuesta en EE.UU. del problema del almacenamiento permanente de los residuos nucleares, pero ahora, al cabo de 22 años y nueve mil millones de dólares gastados, el proyecto ha quedado suspendido.

## Aventuras en el espaciotiempo curvo,

*por Eduardo Guéron*

La posibilidad de “nadar” y “planear” en un espacio curvo y vacío demuestra que, pasados más de noventa años, la teoría de la relatividad general de Einstein sigue sorprendiendo.

